

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA
PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO
UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

CLEDE SALINAS ANTEZANA

ASESOR

M.Sc. JUAN WALTER CABRERA CABRERA

LIMA - PERÚ

2020

© 2020 Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos”.

Salinas Antezana, Clede

csalinasa@uni.pe

Telf. 947-932-414

Dedicatoria

A mis padres, que me brindan siempre su apoyo incondicional y me motivan a seguir avanzando.

Agradecimiento

Doy gracias a los profesores de mi querida Alma Mater, quiénes durante mi etapa universitaria e incluso luego siempre tienen la voluntad de enseñar y guiar. Gracias por ser mi ejemplo a seguir en lo profesional y personal. Gracias por su labor y contribución a nuestro País.

Quedo muy agradecida a mi asesor por su tiempo, apoyo y enseñanza durante el desarrollo de la tesis. Considero que el apoyo de mi asesor fue muy importante para que mi tesis pueda concretarse. Muchas gracias Ing. Juan Walter Cabrera

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
PRÓLOGO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	11
LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS	12
CAPÍTULO I: INTRODUCCION	14
1.1 GENERALIDADES	14
1.2 PROBLEMÁTICA	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 HIPÓTESIS	18
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	19
2.1 PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO	19
2.1.1 Tamaño de las partículas del suelo y clasificación.....	19
2.1.2 Relación peso – volumen de los suelos	20
2.1.3 Resistencia del suelo al corte	21
2.1.4 Permeabilidad.....	22
2.2 PRESAS DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES.....	25
2.2.1 Propiedades de los relaves.....	26
2.2.2 Métodos de construcción.....	28
2.3 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN.....	30
2.3.1 Ley de Darcy	30
2.3.2 Ecuación de continuidad.....	31
2.3.3 Fuerzas de filtración	33
2.3.4 Análisis de infiltración en presas de relave	33
2.3.5 Programa de cómputo Seep/W.....	34
2.4 FILTRACIONES Y DRENES	34
2.4.1 Efecto de las filtraciones en las presas.....	34
2.4.2 Medidas de control de las filtraciones	35
2.4.3 Filtros y drenes	36

2.5	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	37
2.5.1	Métodos de equilibrio límite	37
2.5.2	Condiciones de carga	41
2.5.3	Programa de cómputo Slope/W	43
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		44
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO	44
3.1.1	Obtención de las propiedades de los materiales.....	47
3.2	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE LA PRESA EXISTENTE.....	49
3.2.1	Geometría de la sección transversal evaluada	50
3.2.2	Asignación de los materiales en el modelo numérico.....	50
3.2.3	Condiciones de borde para el análisis de infiltración.....	53
3.2.4	Malla de elementos finitos	53
3.3	ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN DE LA PRESA EXISTENTE	54
3.4	CALIBRACIÓN DEL MODELO DE LA PRESA EXISTENTE	54
3.5	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA PRESA EXISTENTE	55
3.6	CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO NUMÉRICO MODIFICADO.....	55
3.7	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	57
CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES.....		60
4.1	ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN Y ESTABILIDAD DE LA PRESA EXISTENTE.....	60
4.2	ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN Y ESTABILIDAD DE LA PRESA EXISTENTE CON EL SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO HACIA AGUAS ARRIBA	61
4.3	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA PRESA EXISTENTE CONSIDERANDO UN DREN HORIZONTAL.....	67
4.4	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA PRESA SIN Y CON SISTEMA DE FILTRO PARA DIFERENTES ALTURAS DE LA PRESA	69
4.4.1	Para una altura de la presa H= 7.5 m	69
4.4.2	Para una altura de la presa H= 8.5 m	71
4.4.3	Para una altura de la presa H= 9.5 m	73
4.4.4	Para una altura de la presa H= 10.5 m	75

4.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA PRESA CON SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO	77
	CAPÍTULO V: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	80
5.1	EFFECTO DEL USO DE UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO HACIA AGUAS ARRIBA EN EL FACTOR DE SEGURIDAD DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES	80
5.2	INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	81
5.2.1	Influencia de la longitud del filtro en el factor de seguridad	81
5.2.2	Influencia de la altura de la presa en el factor de seguridad	83
	CONCLUSIONES.....	86
	RECOMENDACIONES.....	88
	BIBLIOGRAFÍA.....	89

RESUMEN

La presente investigación analiza cómo influye la colocación de un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba en la estabilidad física del talud aguas abajo de una presa de almacenamiento de relaves existente durante la operación. Para ello el indicador de estabilidad analizado fue el factor de seguridad. Se denomina sistema de filtro extendido hacia aguas arriba de la presa, a la capa del material drenante usado como filtro y colocado en forma horizontal. Esta capa está ubicada a lo largo del cuerpo de la presa y se extiende hacia aguas arriba, quedando el tramo extendido por debajo del relave almacenado.

El análisis realizado consistió inicialmente en comparar el valor del factor de seguridad obtenido cuando la presa existente no tiene el sistema de filtro y cuando posee el sistema de filtro. Seguidamente se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar cómo influye la longitud del filtro aguas arriba y la altura de la presa en el factor de seguridad, para realizar este análisis se realizaron 30 simulaciones.

De la investigación realizada se puede concluir que el uso del sistema de filtro incrementa el valor del factor de seguridad de la presa existente en un 43.7%. Adicionalmente, del análisis de sensibilidad realizado se concluye que el factor de seguridad es independiente de la longitud aguas arriba que tenga el sistema de filtro, pero si depende de la altura de la presa. Para el análisis de sensibilidad realizado se consideró un recrecimiento hacia aguas abajo. El modelo numérico de la presa se calibro verificando la cota de salida del flujo obtenido del análisis de infiltración con la cota real.

ABSTRACT

The present investigation analyzes how the placement of an extended upstream filter system influences in the physical stability of an existing tailings storage. The physical stability was carried out in the downstream slope and the condition considered for the dam was during the operation. The stability indicator analyzed was the safety factor. The layer of free-draining material used as a filter and placed horizontally is called the filter system and it is extended upstream of the dam. This layer is placed along the body of the dam and extends upstream, below the stored tailings.

The analysis carried out initially consisted in the comparison between the value of the safety factor obtained when the existing dam does not have the filter system and when it has the filter system. Subsequently, a sensitivity analysis was carried out to evaluate how the length of the upstream filter and the height of the dam influence in the safety factor, the sensitivity analysis considered 30 simulations.

From the investigation carried out, it can be concluded that the use of the filter system increases the value of the safety factor of the existing dam by 43.7%. Additionally, the conclusion from the sensitivity analysis is that the safety factor is independent of the length upstream of the filter system, but it depends on the height of the dam. For the sensitivity analysis carried out, the downstream construction method was used. The numerical model of the dam was calibrated by verifying the flow outlet elevation obtained from the infiltration analysis with the real elevation.

PRÓLOGO

Perú es un país con un enorme potencial minero, representado por los yacimientos de diferentes minerales localizados especialmente a lo largo de los andes occidentales. Este potencial involucra yacimientos metálicos y no metálicos, que incluyen oro, plata, cobre, zinc, plomo y los más recientemente encontrados yacimientos de Litio. A pesar de ello, la minería no se desarrolló a la par de su potencial posiblemente por la falta de claridad en la legislación y la inestabilidad permanente de los sucesivos gobiernos. Es recién en los últimos 25 años que el país ha vivido un rápido crecimiento en el número de proyectos de exploración y explotación minera, convirtiendo a esta actividad en la principal fuente de ingresos para el país. Este crecimiento ha venido acompañado de grandes inversiones y a la vez de protestas sociales, lo que ha generado la necesidad de desarrollar un sistema de monitoreo para verificar la no afectación del medio ambiente y especialmente, de las fuentes de agua. Especial interés presenta el manejo de los denominados “relaves mineros”, los cuales se almacenan en depósitos usualmente ubicados en quebradas secas y limitados por un dique artificial.

Los depósitos de relaves constan de un dique que permite definir el almacenamiento disponible para la deposición del relave; éste último es vertido en forma de lodo, con pH neutro, lo que genera presiones hidrostáticas sobre el dique, haciendo necesaria una evaluación de estabilidad para prever y reducir cualquier riesgo de falla. La estabilidad se evalúa sobre la base de un “factor de seguridad” definido como la relación entre el esfuerzo de corte resistente del suelo y el esfuerzo de corte actuante. Como se puede inferir, una menor presión hidrostática reducirá el cortante sobre el dique, motivo por el cual se hace necesario mantener la carga hidráulica a niveles relativamente bajos para así reducir el cortante actuante y consecuentemente incrementar el factor de seguridad. En este contexto que se desarrolla la presente investigación: evaluar el efecto de incluir un filtro longitudinal en la base del dique sobre el factor de seguridad de la estructura.

El análisis realizado se centra en la construcción de un modelo numérico en base a datos reales, y la posterior simulación de diferentes escenarios para evaluar la

influencia de las variables longitud de filtro y altura del dique sobre el factor de seguridad. Los resultados muestran un incremento de hasta el 45.7% en el factor de seguridad del dique respecto a las condiciones iniciales. Los resultados permiten evaluar la pertinencia del uso de filtros longitudinales en lugar de los clásicos filtros transversales, así como optimizar sus dimensiones sobre la base de las variables analizadas, siempre garantizando la estabilidad de la estructura.

El presente documento servirá de aporte a las futuras generaciones de ingenieros que sabrán continuar con esta línea de investigación y buscarán su aplicación a las diferentes necesidades regionales de nuestro país.

EL ASESOR

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1 (a) Suelo en estado natural y (b) tres fases del suelo	20
Figura N° 2 Coeficiente de permeabilidad equivalente para un suelo estratificado, flujo horizontal.	24
Figura N° 3 Coeficiente de permeabilidad equivalente para un suelo estratificado, flujo vertical.....	25
Figura N° 4 Medidas en el diseño para el control de las filtraciones y erosión a través y debajo del cuerpo de la presa con fundaciones altamente permeables. A, núcleo de baja permeabilidad; B, filtro/dren chimenea; C, zona aguas abajo; D, filtro/dren horizontal; E, colchón aguas arriba con baja permeabilidad; F, zanja; G, pantalla de impermeabilización; H, pozos; I, berma.	36
Figura N° 5 Fuerzas consideradas en una falla circular.	38
Figura N° 6 Diferentes formas de superficies de deslizamiento	39
Figura N° 7 Sección del depósito de relaves en estudio	45
Figura N° 8 Sección transversal de la presa existente	51
Figura N° 9 Regiones que conforman la sección transversal del depósito de relaves evaluado.....	51
Figura N° 10 Asignación de los materiales a las regiones dibujadas.	52
Figura N° 11 Condiciones de borde para el análisis de infiltración.....	53
Figura N° 12 Malla de elementos finitos, elementos triangulares y cuadrangulares.	54
Figura N° 13 Ubicación de la salida del flujo.	54
Figura N° 14 Regiones que conforman la sección transversal del depósito de relaves con el sistema de filtro.	56
Figura N° 15 Longitudes del sistema de filtro extendido hacia aguas arriba L1, L2, L3, L4 y L5.....	57
Figura N° 16 Alturas de la presa H_1 , H_2 , H_3 , H_4 y H_5 . Donde H es la altura de la presa en metros.....	58
Figura N° 17 (A) Posición del nivel freático y presión de poros, resultado obtenido del análisis de infiltración de la presa existente. Longitud de la playa de relaves igual a 0 m. (B) Red de flujo.	60
Figura N° 18 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa existente, obtenido del análisis de estabilidad física. Longitud de la playa de relaves igual a 0 m.	61

Figura N° 19 Presa existente (A) sin sistema de filtro, (B) con el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba.....	62
Figura N° 20 Análisis de infiltración de la presa existente con el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba.....	64
Figura N° 21 Redes de flujo de la presa existente sin sistema de filtro y con sistema de filtro.....	66
Figura N° 22 Análisis de estabilidad de la presa existente con el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba.....	67
Figura N° 23 Análisis de estabilidad de la presa existente considerando un dren horizontal. Longitud de dren horizontal (A) 5 m, (B) 10 m, (C) 15 m y (D) 20 m.	68
Figura N° 24 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa sin sistema de filtro para una altura $H= 7.5$ m.	69
Figura N° 25 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L= 5$ m, altura de la presa $H= 7.5$ m.	70
Figura N° 26 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L= 10$ m, altura de la presa $H= 7.5$ m.	70
Figura N° 27 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L= 15$ m, altura de la presa $H= 7.5$ m.	70
Figura N° 28 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L= 0$ m, altura de la presa $H= 7.5$ m.....	70
Figura N° 29 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L= 25$ m, altura de la presa $H= 7.5$ m.....	71
Figura N° 30 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa sin sistema de filtro para una altura $H= 8.5$ m.	71
Figura N° 31 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L= 5$ m, altura de la presa $H= 8.5$ m.	72
Figura N° 32 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 10$ m, altura de la presa $H= 8.5$ m.....	72
Figura N° 33 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 15$ m, altura de la presa $H= 8.5$ m.....	72
Figura N° 34 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 0$ m, altura de la presa $H = 8.5$ m.....	72
Figura N° 35 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 25$ m, altura de la presa $H = 8.5$ m.....	73

Figura N° 36 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa sin sistema de filtro para una altura $H = 9.5$ m.	73
Figura N° 37 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 5$ m, altura de la presa $H = 9.5$ m.	74
Figura N° 38 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 10$ m, altura de la presa $H = 9.5$ m.	74
Figura N° 39 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 15$ m, altura de la presa $H = 9.5$ m.	74
Figura N° 40 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 20$ m, altura de la presa $H = 9.5$ m.	74
Figura N° 41 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 0$ m, altura de la presa $H = 9.5$ m.	75
Figura N° 42 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 25$ m, altura de la presa $H = 9.5$ m.	75
Figura N° 43 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa sin sistema de filtro para una altura $H = 10.5$ m.	76
Figura N° 44 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 5$ m, altura de la presa $H = 10.5$ m.	76
Figura N° 45 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 10$ m, altura de la presa $H = 10.5$ m.	76
Figura N° 46 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 15$ m, altura de la presa $H = 10.5$ m.	76
Figura N° 47 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 20$ m, altura de la presa $H = 10.5$ m.	77
Figura N° 48 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 0$ m, altura de la presa $H = 10.5$ m.	77
Figura N° 49 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 25$ m, altura de la presa $H = 10.5$ m.	77
Figura N° 50 Valores del factor de seguridad versus longitud del sistema de filtro.	81
Figura N° 51 Valores del caudal en el filtro versus longitud del filtro.	83
Figura N° 52 Valores del factor de seguridad versus la altura de la presa.	84

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1 Clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas.	19
Tabla N° 2 Valores típicos del coeficiente de permeabilidad para suelos saturados.	23
Tabla N° 3 Valores típicos de la permeabilidad de los relaves.	27
Tabla N° 4 Características de los métodos de equilibrio para el análisis de taludes.	39
Tabla N° 5 Valores del factor de seguridad recomendados para presas de relave.	41
Tabla N° 6 Propiedades de los materiales de la presa existente.....	47
Tabla N° 7 Simulaciones consideradas en el análisis de sensibilidad.	58
Tabla N° 8 Condición de borde para las simulaciones.	59
Tabla N° 9 Factores de seguridad en condiciones estáticas.	78
Tabla N° 10 Valores del factor de seguridad de la presa en estudio sin y con sistema de filtro para diferentes alturas.	80
Tabla N° 11 Caudal en la salida del filtro	82
Tabla N° 12 Cálculo matemático del factor de seguridad.....	85

LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

MIT	Instituto de Tecnología de Massachusetts
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
AASHTO	Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de suelos
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales
FEMA	Agencia Federal para Manejo de Emergencias
V	Volumen del suelo
V_s	Volumen de sólidos del suelo
V_v	Volumen de vacíos
V_w	Volumen del agua
V_a	Volumen del aire
W	Peso total del suelo
W_s	Peso de sólidos
W_w	Peso del agua
e	Relación de vacíos
n	Porosidad
S	Grado de saturación
ω	Contenido de humedad
γ	Peso específico
θ	Contenido volumétrico del agua
G_s	Gravedad específica
τ_f	Esfuerzo cortante
σ	Esfuerzo normal
c	Cohesión
ϕ	Ángulo de fricción
σ'	Esfuerzo efectivo
μ	Presión de poros del agua
c'	Cohesión efectiva
ϕ'	Ángulo de fricción efectiva
k	Coeficiente de permeabilidad
cm/s	Centímetro por segundo
mm/s	Milímetro por segundo

$k_{H(eq)}$	Conductividad hidráulica equivalente
$k_{v(eq)}$	Conductividad equivalente hidráulica
m/s	Metro por segundo
FS	Factor de seguridad
c_u	Cohesión no drenada
ϕ_u	Ángulo de fricción no drenado
v	Velocidad de infiltración
i	Gradiente hidráulica
q	Caudal de infiltración
A	Sección perpendicular a la dirección del flujo
H	Altura total
k_x	Conductividades hidráulicas en la dirección x
k_y	Conductividades hidráulicas en la dirección y
Q'	Flujo de frontera
θ	Variación volumétrica de agua
t	Tiempo
k_w	Coeficiente de permeabilidad del agua de un suelo no saturado en función de la presión de poros
h_w	Altura total del agua
γ_w	Peso específico del agua
MPa	Mega pascales
kN/m ³	Kilonewton por metro cúbico
γ_{sat}	Peso unitario saturado
γ_{seco}	Peso unitario seco
msnm	Metros sobre el nivel del mar
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
km	Kilómetros
L_i	Longitud del filtro
H_i	Altura de la presa
S_i	Simulaciones

CAPÍTULO I: INTRODUCCION

1.1 GENERALIDADES

La minería ha sido históricamente una de las actividades económicas principales en el Perú republicano, representando en el primer periodo del año 2016 el 14.36% del PBI. Esta actividad puede desarrollarse a tajo abierto o en socavón. Durante el proceso de extracción del mineral se generan desechos, uno de los cuales es el relave (mezcla de roca molida, mineral de ganga y agua). Estos relaves son descargados en forma de lodo en los depósitos de relave, los cuales suelen ubicarse en quebradas inactivas y como estructura de almacenamiento del relave se construyen presas; estas presas pueden estar conformadas por relave o material de préstamo (McLeod y Murray, 2003).

Un inapropiado diseño y manejo de un depósito de relaves puede causar la falla de la presa de almacenamiento de relaves. Por ello, estas deben ser diseñadas, construidas y operadas con los estándares más altos cumpliendo con los siguientes requerimientos básicos: proveer seguridad, ser estable, no contaminar el ambiente, presentar insignificante riesgo a la salud y seguridad pública. (Departamento de Recursos, Energía y Turismo del Gobierno de Australia , 2016).

Las presas de almacenamiento de relaves pueden llegar a almacenar millones de toneladas de relaves, así como grandes cantidades de agua sobrenadante, se denomina agua sobrenadante al agua que se almacena en la superficie del vaso. Existen dos tipos básicos de estructuras para el almacenamiento de los relaves: presas de retención y presas recrecidas. Las presas de retención son construidas al tamaño total antes que sean depósitos de los relaves, mientras que las presas recrecidas son construidas en fases acorde al volumen que se necesita (Pak y Nabipour, 2017). Así como lo menciona Vick (1983), UNEP (1996), Mittal and Morgenstern (1977), en Pak y Nabipour (2017), las presas recrecidas pueden ser construidas usando el método aguas arriba, aguas abajo o línea central.

Las presas de almacenamiento de relaves son susceptibles a fallas. Según indica Azam y Li (2010), durante los últimos cien años 1.2% de un total de 18 401 presas de almacenamiento de relaves a nivel mundial han fallado causando los siguientes

impactos: contaminación ambiental, pérdida de vidas humanas y pérdidas económicas.

La Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) Boletín 121 (2001), en Pak y Nabipour (2017), identifica las principales causas por las cuales las presas fallan, las cuales son: inestabilidad del talud, carga de sismo, desbordamiento, fundaciones inadecuadas y filtraciones. UNEP (2001), US (1994), Abadjiev (1976), Shen et al. (2011), en Pak y Nabipour (2017), indicaron que las filtraciones es uno de los factores más importantes que afectan la estabilidad de la presa de relaves.

Los efectos que causan las filtraciones no controladas son: erosión regresiva, concentración de flujo de agua y erosión interna. Esto ocurre cuando la fuerza hidráulica impuesta por las filtraciones excede la capacidad de cohesión del material de la presa y su fundación (Departamento de Recursos, Energía y Turismo del Gobierno de Australia, 2016). Si el material en una presa zonificada no tiene capacidad de filtro, la erosión va a continuar y progresar hacia la falla (Bridle, 2013). Las filtraciones causan también presiones internas con componentes opuestas al efecto estabilizador del peso. Por los efectos que tienen las filtraciones en el cuerpo de la presa, es importante controlarlos (Cardona et al., 2012).

Los drenes o sistemas de filtros son medios de control de las filtraciones cuya función es captar y conducir el flujo hacia aguas abajo, influyendo en la velocidad de la filtración y en la magnitud de la subpresión (Tanchev, 2014). Valipour (2012), en Pak y Nabipour (2017), indica que un adecuado drenaje interno en el cuerpo de la presa mejora la estabilidad estructural, mejora también la consolidación y decrece la probabilidad de licuefacción de los relaves.

La United States Bureau of Reclamation (USBR, 2011) sugiere que para soportar la parte central de la presa el lado aguas abajo debe estar no saturado; para prevenir que el lado aguas abajo se sature y la presión de poros aumente, se debe reducir el nivel freático según indica Justion (1932), en Calamk et al., (2016). De acuerdo con Singh y Varshney (1995), citado en Calamk et al., (2016), en una presa de tierra la altura del nivel freático puede reducirse colocando una zona no

impermeable en la presa o colocando estructuras de drenaje en el cuerpo de la presa de tal manera que conduzca el flujo de una manera segura.

Se han llevado a cabo varios estudios sobre los drenes o filtros. Por ejemplo “Effect of drainage properties on seepage Behavior of Earth- Fill Dams” realizado por Calamk et al. (2016) en el cual se estudia el efecto de la variación de la longitud de un dren longitudinal en la presión de poros, nivel freático y ratio de filtraciones. Una de las conclusiones de este estudio es la siguiente: es más importante determinar la longitud del filtro que el espesor del mismo. La efectividad de la estructura de drenaje está ligado a las propiedades del material que lo compone y a sus propiedades geométricas (Calamk et al., 2016).

Pak y Nabipour, (2017) estudiaron el desempeño de los sistemas de drenaje en las presas de relave analizando la zona saturada y no saturada, considerando los efectos de los métodos de construcción, las propiedades de los relaves y el tipo del sistema de drenaje. Una de sus conclusiones fue que usando un dren longitudinal y/o dren chimenea se puede incrementar el factor de seguridad hasta dos veces, dependiendo del tipo del material.

Complementariamente, en el artículo de investigación publicado por Saad (2013) “Mitigation Measures for Stability Enhancement of Tailing Dams during Construction”, Saad propone la extensión de un sistema de filtro hacia aguas arriba de la presa de almacenamiento de relaves para mejorar la estabilidad durante la construcción, en un recrecimiento aguas arriba.

En nuestro país es poca la investigación relacionada a sistemas de filtros en presas, la mayoría de las tesis existentes hacen referencia al análisis de estabilidad, análisis sísmico, análisis de infiltración, procesos constructivos, control de calidad durante la construcción y diseño de la presa de almacenamiento de relaves.

Bajo este marco, en la presente investigación se evalúa la influencia del sistema de filtro (sistema propuesto por Saad) en el factor de seguridad de una presa de almacenamiento de relaves existente con un tipo de recrecimiento aguas abajo. Este sistema es conocido como “sistema de filtro extendido hacia aguas arriba”.

Para este fin se analizará una presa cuyo cuerpo está conformado por material de mina, conocido también como desmonte de mina, por representar una configuración típica en el país (Villanueva, 2006).

1.2 PROBLEMÁTICA

La falla de una presa de almacenamiento de relaves causa graves impactos sobre la población y el medioambiente; un ejemplo es la falla de la presa Samarco que ocurrió en Brasil en 2015. La catástrofe causó 17 pérdidas humanas, la inundación de la comunidad de Bento Rodríguez, la contaminación de los ríos Gualaxo Norte, Carmel y Doce. A continuación, se describe el mecanismo de falla descrito en el reporte de Golder Associates (Golder, 2016); “se desencadenaron múltiples cambios en la sección de la presa debido inicialmente a la falla del dren basal, esto permitió la alta saturación y precipitación de una capa de limo dentro de la presa de arena, la cual originalmente fue diseñada para ser drenada y no susceptible al desarrollo del mecanismo de falla”.

En nuestro medio se tiene poca información sobre las fallas de presas de almacenamiento de relaves y sus causas; sin embargo, se pueden mencionar tres fallas ocurridas hasta el año 2010 (Wise, 2017):

- Falla de la presa de almacenamiento de relaves, causa no identificada. Unidad Minera Caudalosa Chica; ubicación: Huancavelica, 2010; cantidad de relave: 21,420 m³; impacto: contaminación del Río Escalera y Río Opamayo 110 km aguas abajo.
- Falla presa de almacenamiento de relaves por licuefacción. Ubicación; Nazca, 1996; cantidad de relave: 230,000 m³; impacto: el relave cubrió alrededor de 16 hectáreas.
- Falla de presa de almacenamiento de relaves por licuefacción, 1962. No se especifica detalles.

Actualmente en el Perú existe un total de 113 presas de almacenamiento de relaves en operación (ANA, 2015). Por lo tanto, asegurar la estabilidad física de estas estructuras es importante debido a los posibles impactos que podría ocasionar la falla de esta estructura.

En la presente tesis se evalúa la influencia del uso de un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba en el factor de seguridad de la estabilidad física de la presa, el sistema de filtro es extendido hacia el vaso, aguas arriba de la presa.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el efecto del uso de un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba en el factor de seguridad de la presa de almacenamiento de relaves en condiciones estáticas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la estabilidad e infiltración en la presa de almacenamiento de relaves.
- Evaluar la estabilidad e infiltración en la presa de almacenamiento de relaves con un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba.

1.4 HIPÓTESIS

El uso de un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba incrementa el factor de seguridad de la presa de almacenamiento de relaves.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO

2.1.1 Tamaño de las partículas del suelo y clasificación

Las propiedades físicas del suelo dependen del tamaño, forma y composición química de las partículas que lo conforman. Las partículas que forman el suelo son de diferentes tamaños, dependiendo del tamaño predominante son generalmente llamados gravas, arenas, arcillas o limos (Das, 2008).

En el cuadro líneas abajo se muestra la clasificación del suelo por el tamaño de sus partículas realizada por varias organizaciones (Das y Sobhan, 2013).

Tabla N° 1 Clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas.

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	>2	2 - 0.06	0.06 - 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)	>2	2 - 0.05	0.05 - 0.002	< 0.022
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76.2 - 2	2 - 0.075	0.075 - 0.002	< 0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	76.2 - 4.75	4.75 - 0.075	Finos (limos y arcillas) <0.075	

Fuente: Das y Sobhan , 2013.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) clasifica los suelos basado en los siguientes resultados: tamaño de las partículas, límite líquido y plasticidad (este último es usado cuando se requiere una clasificación más precisa); este sistema está siendo adoptada por la Asociación Americana de Ensayo de Materiales. El estándar ASTM D-2487 describe el SUCS (Das y Sobhan , 2013).

2.1.2 Relación peso – volumen de los suelos

Los suelos están conformados por tres fases: partículas sólidas, agua y aire. Estas tres fases se representan en la figura N° 1 (Das y Sobhan, 2013).

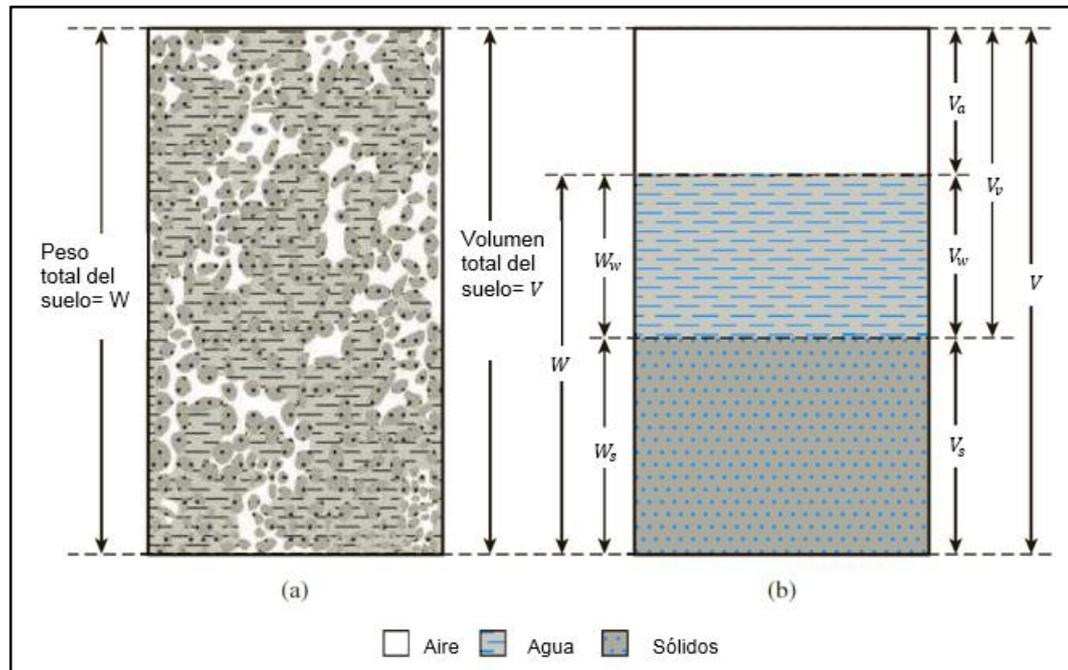


Figura N° 1 (a) Suelo en estado natural y (b) tres fases del suelo

Fuente: Das y Sobhan , 2013.

El volumen del suelo puede ser expresado de la siguiente forma:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a \quad (1)$$

Donde:

V_s = Volumen de sólidos del suelo

V_v = Volumen de vacíos

V_w = Volumen del agua

V_a = Volumen del aire

El peso total del suelo se expresa de la siguiente forma:

$$W = W_s + W_w \quad (2)$$

Donde:

W_s = Peso de sólidos

W_w = Peso del agua

Las relaciones volumétricas comúnmente usadas son: relación de vacíos, porosidad y el grado de saturación.

Relación de vacíos (e), es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

Porosidad (n), es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (4)$$

Grado de saturación (S), es la relación entre el volumen del agua y el volumen de vacíos.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (5)$$

El contenido de humedad (ω), es la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad (6)$$

Peso específico (γ), es el peso del suelo por unidad de volumen.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (7)$$

Contenido volumétrico del agua (θ), es la relación entre el volumen del agua y el volumen del suelo (volumen total).

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (8)$$

Gravedad específica (G_s), conocida también como la densidad relativa es la relación entre el peso específico de un material y el peso específico del agua.

2.1.3 Resistencia del suelo al corte

Braja M. Das indica que “la resistencia cortante del suelo es la resistencia interna que ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de una superficie” (Das y Sobhan, 2013).

Según Mohr (1900), mencionado en Das y Sobhan (2013), el suelo falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante. La función que relaciona el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal esta expresado en la ecuación (9), la envolvente de falla de esta ecuación es una curva (Das y Sobhan, 2013).

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (9)$$

Coulomb (1776), mencionado en Das y Sobhan (2013), sugiere que para la mayoría de los problemas en la mecánica de suelos es suficiente aproximar el esfuerzo cortante como una función lineal del esfuerzo normal, ecuación (10), esta ecuación es llamada el criterio de falla de Mohr - Coulomb. La ecuación mencionada está en función de dos parámetros del suelo, el coeficiente de cohesión y el ángulo de fricción (Knight, 2015).

$$\tau_f = c + \sigma \tan\phi \quad (10)$$

Donde:

c = cohesión

ϕ = ángulo de fricción

τ_f = esfuerzo cortante

σ = esfuerzo normal

En un suelo saturado el esfuerzo normal es la suma del esfuerzo efectivo σ' y de la presión de poros del agua μ , ecuación (11). En este caso el criterio de falla de Mohr - Coulomb se expresa en términos del esfuerzo efectivo según la ecuación (12) (MacGregor et al., 2014).

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (11)$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\phi' \quad (12)$$

Donde:

c' = cohesión efectiva

ϕ' = ángulo de fricción efectiva

2.1.4 Permeabilidad

La permeabilidad es la medida de cuán rápido el agua va a fluir a través de los espacios vacíos en los suelos y rocas (Raymond, 1988).

Coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad (k) o conductividad hidráulica es una medida cuantitativa de la propiedad de los suelos para dejar pasar el agua cuando están sometidos a gradientes hidráulicas, se expresa en unidades de cm/s o mm/s. Para ciertos suelos saturados se podría considerar constante; sin embargo, para suelos no saturados el coeficiente de permeabilidad varía y se expresa en función del contenido de agua o de la matriz de succión del suelo no saturado (Das y Sobhan, 2013).

El valor coeficiente de permeabilidad es importante debido a que está directamente relacionado con la probabilidad de erosión interna (tubificación). Por ejemplo, si el suelo de fundación bajo la presa tiene una permeabilidad alta, y las velocidades no son controladas entonces puede ocurrir el transporte de finos y desarrollarse la erosión interna (Broaddus, 2015).

El valor del coeficiente de permeabilidad depende de varios factores, los cuales son: viscosidad del fluido, distribución del tamaño de poros, distribución granulométrica, índice de poros, rugosidad de las partículas y el grado de saturación (Das y Sobhan, 2013). En ingeniería geotécnica, las variaciones que pueda tener la viscosidad del fluido con la temperatura son mínimas por lo cual no son consideradas (Broaddus, 2015). Algunos valores típicos del coeficiente de permeabilidad son dados en la tabla N°2 (Das y Sobhan, 2013).

Tabla N° 2 Valores típicos del coeficiente de permeabilidad para suelos saturados.

Tipo de suelo	K
	(cm/ s)
Grava limpia	100^{-1}
Arena gruesa	$1 - 10^{-2}$
Arena fina	$10^{-2} - 10^{-3}$
Arcilla limosa	$10^{-3} - 10^{-5}$
Arcilla	$<10^{-6}$

Fuente: Traducido de Das y Sobhan, 2013.

Variación de la permeabilidad en un medio anisotrópico

Un medio anisotrópico es aquel en el cual sus propiedades varían según la posición en la cual son evaluados. Muchos suelos son anisotrópicos con respecto al coeficiente de permeabilidad, el grado de anisotropía depende del tipo de suelo. En muchos casos la anisotropía es más predominante en suelos arcillosos comparados con los suelos granulares. En suelos anisotrópicos, la dirección del máximo y mínimo valor de permeabilidad son generalmente perpendiculares, siendo la máxima permeabilidad en la dirección horizontal. Se debe tener en cuenta que un suelo anisotrópico la línea de flujo y la línea equipotencial no son ortogonales (Das, 2008).

Coeficiente permeabilidad equivalente para suelos estratificados

En suelos estratificados en los cuales el coeficiente de permeabilidad varía de un estrato a otro, para simplificar el cálculo se puede usar un coeficiente de permeabilidad equivalente, cuando se calcula el coeficiente de permeabilidad equivalente se debe calcular el coeficiente de permeabilidad equivalente horizontal y vertical independientemente, estos coeficientes pueden ser calculados con las fórmulas 13 y 14 respectivamente (Das y Sobhan 2013).

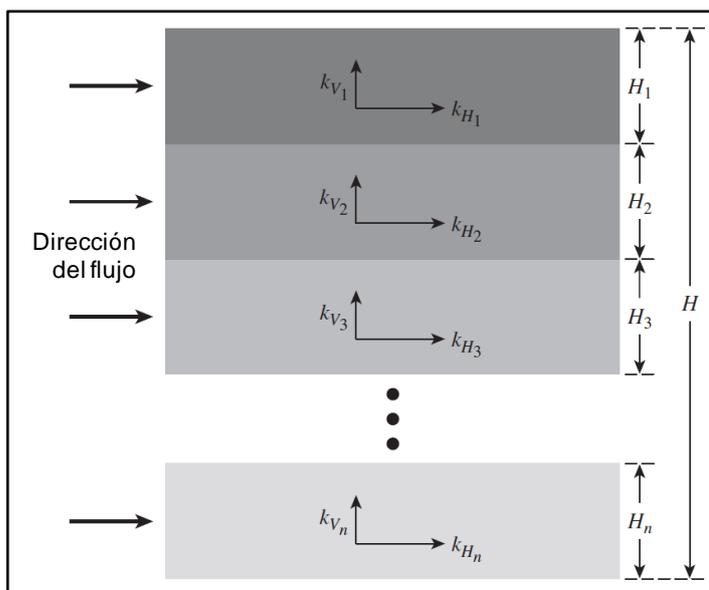


Figura N° 2 Coeficiente de permeabilidad equivalente para un suelo estratificado, flujo horizontal.
Fuente: Das y Sobhan, 2013.

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H} (k_{H_1} H_1 + k_{H_2} H_2 + k_{H_3} H_3 + \dots + k_{H_n} H_n) \quad (13)$$

Donde:

$k_{H_1}, k_{H_2}, k_{H_3}, \dots, k_{H_n}$ son la conductividad hidráulica de cada estrato en la dirección horizontal y $k_{H(eq)}$ es la conductividad hidráulica equivalente en la dirección horizontal, de la ley de Darcy.

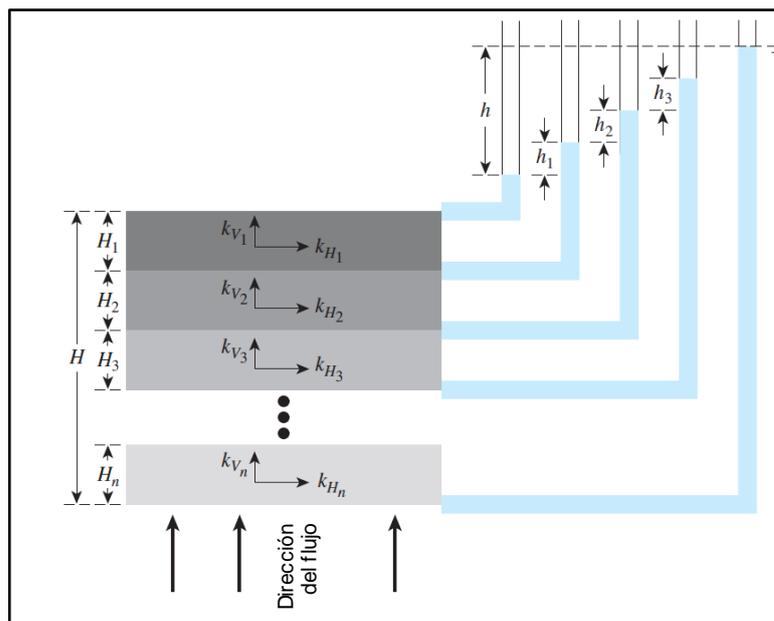


Figura N° 3 Coeficiente de permeabilidad equivalente para un suelo estratificado, flujo vertical.

Fuente: Das y Sobhan, 2013.

$$k_{v(eq)} = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_{v_1}}\right) + \left(\frac{H_2}{k_{v_2}}\right) + \left(\frac{H_3}{k_{v_3}}\right) + \dots + \left(\frac{H_n}{k_{v_n}}\right)} \quad (14)$$

Donde:

$k_{v_1}, k_{v_2}, k_{v_3}, \dots, k_{v_n}$ es la conductividad hidráulica de cada estrato individual en la dirección vertical y $k_{v(eq)}$ es la conductividad equivalente hidráulica.

2.2 PRESAS DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES

Las presas de almacenamiento de relaves son estructuras para contener los relaves, estas pueden ser construidas usando el mismo relave o con material de préstamo (como en el caso de una presa de agua). Cuando se usa el relave como cuerpo, se emplea los métodos de construcción aguas arriba, línea central o

aguas abajo. Los relaves son una combinación de sólidos, agua y aire cuando no están saturados (MacGregor et al., 2014).

2.2.1 Propiedades de los relaves

Las propiedades de los relaves difieren considerablemente dependiendo del mineral del que provienen, del proceso del mineral y si el mineral se puede oxidar. Dentro de las propiedades de los relaves se puede mencionar el tamaño de las partículas, la mineralogía (está relacionado con la mineralogía de las partículas que lo constituyen), la densidad seca, relación de vacíos, la permeabilidad, la pendiente que forman en la playa de relaves y debajo del agua sobrenadante, la resistencia al corte drenado y no drenado (MacGregor et al., 2014).

Tamaño de las partículas y su gradación

La gradación ocurre tanto a lo largo de la playa de relaves (horizontalmente) así como verticalmente. Esto debido a que las partículas gruesas se asientan más rápido que las finas, por lo tanto, las partículas gruesas se depositan cerca de los puntos de descarga y en la base de las capas, pudiendo formar una capa fina de arena. La gradación depende del método de descarga y del contenido de sólidos del relave que se descarga (MacGregor et al., 2014).

Densidad seca y relación de vacíos

Es importante conocer la densidad del relave, debido a que influye directamente en la sedimentación de las partículas y permite determinar la cantidad de relave que puede ser almacenado. Así también es relevante conocer la densidad seca, por ejemplo, después de la desecación y/o consolidación. Conocer la densidad relativa de las arcillas y arenas es también importante ya que influyen en el poder de licuefacción del suelo. La densidad depende del tipo de relave, del método de disposición, condiciones de drenaje, grado de desecación, distancia del punto de descarga, proximidad al agua sobrenadante, etc (MacGregor et al., 2014).

Permeabilidad

La permeabilidad del relave depende del tipo del relave, del tamaño de las partículas y de la mineralogía, del método de disposición, del grado de consolidación y/o desecación (densidad seca/ relación de vacíos), agrietamiento y si el relave está saturado o parcialmente saturado. Cuando el relave es depositado sin haber sido espesado, existe una segregación de las partículas gruesas con respecto a las partículas finas con respecto a la distancia desde el punto de descarga, por lo tanto, la permeabilidad del relave varía, típicamente una permeabilidad alta cerca del punto de descarga y a menor distancia; y una baja permeabilidad, a medida que aumenta la profundidad, debido a la consolidación. Además, entre cada capa de relave, las partículas gruesas se depositan a una ratio diferente que las partículas finas; por lo tanto, existe una segregación vertical en las capas. Para la mayoría de los relaves, las partículas largas se depositan en el fondo de la capa y podrían formar una capa delgada de arena (MacGregor et al., 2014).

En el cuadro que se presenta líneas abajo se muestran permeabilidades típicas de los relaves, estos valores probablemente representan el promedio de las permeabilidades verticales. La permeabilidad horizontal varía con el grado de segregación y la variabilidad de la deposición (MacGregor et al., 2014).

Tabla N° 3 Valores típicos de la permeabilidad de los relaves.

Tipo del relave	Permeabilidad promedio (m/s)
Arenas cicloneadas con menos del 15% de finos	10^{-4} a 10^{-5}
Playa de arena descargada periféricamente hasta con 30% de finos	10^{-5} a 5×10^{-6}
Arcillas con no plasticidad o baja plasticidad	10^{-7} a 5×10^{-9}
Arcillas con alta plasticidad	10^{-6} a 10^{-10}

Fuente: Cuadro adaptado de MacGregor et al. (2014).

Pendiente de la playa de relaves y debajo del agua sobrenadante

Los relaves almacenados en la presa de relaves forman una playa con una pendiente y se acomodan bajo el agua sobrenadante también con una pendiente. El perfil de las playas de relaves varía dependiente de cada tipo de relave. El tamaño de las partículas, la gravedad específica y el contenido de sólidos de los relaves afectan el perfil. Las playas sobre el nivel del agua son comúnmente más empinadas cerca de los puntos de descarga, que lejos de este punto (MacGregor et al., 2014).

Resistencia al corte drenado y no drenado

Usando la resistencia al corte drenado, es decir parámetros en esfuerzos efectivos, la resistencia es sobrestimada. Es recomendable usar los parámetros de la resistencia al corte no drenado; debido a que, si los relaves se sueltan y se saturan, estos van a ser contractivos y desarrollarán un incremento en las presiones de poros, el colapso de la superficie y un esfuerzo envolvente menor que la resistencia al corte drenado especialmente en los relaves finos (MacGregor et al. 2014).

2.2.2 Métodos de construcción

Para la construcción del cuerpo de la presa de almacenamiento de relaves se puede usar el mismo relave o los materiales usados en las presas de agua (tierra, roca o concreto) (MacGregor et al., 2014).

Construcción usando el relave

Existen 3 métodos de construcción cuando se usan los relaves como material para el cuerpo de la presa: método hacia aguas arriba, método hacia aguas abajo y método línea central (MacGregor et al., 2014).

Método hacia aguas arriba

Las características importantes de este método de construcción son:

- El dique de inicio es para el almacenamiento del relave descargado. Puede ser conformado por roca, lo cual permite el drenaje de las filtraciones y el control de la erosión, también puede estar conformado por material impermeable o relaves secos (MacGregor et al., 2014).
- La descarga del relave debe ser controlada para asegurar que el material más grueso del relave sea depositado cerca de la presa de arranque. Esto es importante para el control de las filtraciones (MacGregor et al., 2014).
- El agua sobrenadante debe mantenerse lejos de la presa. Debido a que, si está cerca, el nivel piezométrico aumenta, lo cual puede originar la inestabilidad del talud o la erosión interna o tubificación (MacGregor et al., 2014).
- Es poco usado en áreas con riesgo sísmico, debido a que el material grueso del relave tiene una densidad relativa mediana a baja, el cual si es saturado y sujeto a un terremoto podría ocurrir la licuefacción del material (MacGregor et al., 2014).

Método hacia aguas abajo

La característica principal de este método es que el cuerpo de la presa es de material seleccionado (MacGregor et al., 2014).

La presa es mejor construida si al menos una parte está conformada por material permeable lo cual permite un control piezométrico. La combinación del método aguas arriba y aguas abajo puede también ser usado, debido a que recrecer la presa hacia aguas abajo es costoso (MacGregor et al., 2014).

Método línea central

Las características importantes de este método son:

(MacGregor et al., 2014).

- Esta presa es construida parcialmente por material seleccionado.
- El agua sobrenadante debe ser mantenida lejos del borde de la presa para prevenir excesivas presiones piezométricas y controlar la erosión interna y la tubificación.
- Es esencial que la descarga del relave sea de manera controlada.

Construcción usando una sección típica de la presa de agua

Para el almacenamiento del relave se emplean presas de tierra, roca y concreto. Algunos factores que varían con respecto a una presa de agua son:

- A diferencia de una presa de agua, si en una presa de relaves se tienen filtraciones, entonces va a ser necesario colectarlas aguas abajo o van a ser necesario sistemas de drenaje, esto si es que la aguas contienen contaminantes (MacGregor et al., 2014).
- En la minería existe gran cantidad de roca triturada disponible producto de la operación minera, lo cual puede ser usada para construir la presa a un bajo costo. Bajo esta situación es posible colocar y compactar la roca. Se debe revisar la presencia de pirita en la roca, debido a que la pirita puede generar aguas ácidas (MacGregor et al., 2014).
- La construcción en etapas es usualmente requerida (MacGregor et al., 2014).

2.3 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN

El movimiento del agua a través del medio poroso o flujo de mayor a menor energía, debido a las fuerzas de gravedad se denominan filtraciones, en las presas de tierra estas filtraciones pueden ocurrir en la fundación, en los estribos y a través del cuerpo de la presa (Tanchev, 2014). El estudio del agua a través del medio poroso permite calcular la cantidad de flujo en las filtraciones, realizar un análisis de infiltración, evaluar la erosión, dimensionar los sistemas de drenaje, calcular asentamientos en el tiempo (consolidación) y realizar el análisis de estabilidad de las presas de tierra (Das y Sobhan, 2013).

2.3.1 Ley de Darcy

La ecuación de Darcy relaciona la velocidad con la gradiente hidráulica bajo condiciones de flujo laminar (Broaddus, 2015)

Darcy en 1856, mencionado en Das (2008), determinó empíricamente la relación entre la velocidad de infiltración y la gradiente hidráulica para flujos unidimensionales y permanentes en suelos saturados, relación denominada ley de Darcy, ecuación (15).

$$v = ki \quad (15)$$

Donde:

v = velocidad de infiltración

k = coeficiente de permeabilidad

i = gradiente hidráulica

Por lo tanto, el caudal de infiltración q está dado por:

$$q = kiA \quad (16)$$

Donde A es la sección perpendicular a la dirección del flujo.

La ecuación de Darcy se cumple para flujos laminares y para un amplio rango de suelos. El flujo a través del suelo se considera laminar; sin embargo, en rocas fracturadas, gravas y arenas gruesas, las condiciones de flujo turbulento pueden existir (Das y Sobhan, 2013).

Richards (1931) y Childs y Collins- George (1950), mencionado en Geo-Slope International Ltd. (2012), indican que la ley de Darcy es aplicable también para suelos no saturados.

2.3.2 Ecuación de continuidad

La ecuación que gobierna el flujo en condiciones saturadas y no saturadas puede ser derivada usando la ecuación de continuidad y la ecuación de Darcy. Richards (1931), mencionado en Calamk et al. (2016), introdujo la ecuación diferencial que gobierna las filtraciones en dos dimensiones, ecuación (17) (Calamk et al., 2016).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q' = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (17)$$

Donde H es la altura total, k_x , k_y son las conductividades hidráulicas en la dirección x y y respectivamente. Q' es el flujo de frontera, θ es la variación volumétrica de agua y t es el tiempo.

Pak y Nabipour (2017) mencionan que la ecuación de flujo para un suelo homogéneo, anisotrópico, no saturado y en condiciones estacionarias está dada por:

$$k_{wx} \frac{\partial h_w}{\partial x^2} + k_{wy} \frac{\partial h_w}{\partial y^2} = 0 \quad (18)$$

Donde, k_w es el coeficiente de permeabilidad del agua de un suelo no saturado, el cual es una función de la presión de poros, y h_w es la altura total del agua (Das y Sobhan, 2013).

Considerando que el flujo es estacionario, isotrópico e incompresible, se obtiene la ecuación de Laplace, ecuación (19) (Das y Sobhan, 2013).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (19)$$

La solución gráfica de la ecuación diferencial de Laplace es una familia de líneas de flujo y líneas equipotenciales ortogonales, las cuales forman una red de flujo (Tanchev, 2014). Las líneas del flujo muestran la dirección de flujo y las líneas equipotenciales muestran la distribución de la energía potencial (Broaddus, 2015). La carga hidráulica se mantiene constante a lo largo de una línea equipotencial, es decir que si se colocaran piezómetros en estos puntos los niveles de agua subirían hasta un mismo nivel (Tanchev, 2014).

La construcción de las redes de flujo puede ser llevada a cabo por medio de métodos aproximados (por ejemplo, la aplicación de modelos hidráulicos en una escala reducida), por modelos análogos, por métodos numéricos y por medios gráficos. Para la construcción de las redes de flujo es importante tener en cuenta las condiciones de borde (Tanchev, 2014).

Las redes de flujo pueden ser usadas para calcular la cantidad de flujo en el suelo y calcular las presiones debajo de las estructuras hidráulicas (Broaddus, 2015).

2.3.3 Fuerzas de filtración

Las filtraciones ejercen sobre las partículas del suelo una fuerza de arrastre, esta fuerza de filtración se agrega a la presión que ejerce el agua sobre el sólido en equilibrio hidrostático (Tanchev, 2014). Considerando que los poros del suelo están llenos por agua, la fuerza de filtración por unidad de volumen del suelo se expresa mediante la ecuación (20), la dirección de esta fuerza es la misma que la dirección del flujo, en un flujo bidimensional la red de flujo es usada para calcular la gradiente hidráulica. (Das y Sobhan, 2013).

$$\begin{aligned} &\text{Fuerza de la filtración por unidad de volumen del sólido de masa} \\ &= \frac{\Delta h \gamma_w L}{L^2} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} &\text{Fuerza de la filtración por unidad de volumen del sólido de masa} \\ &= \gamma_w \frac{\Delta h}{L} = \gamma_w i \end{aligned} \quad (21)$$

Donde i es la gradiente hidráulica y γ_w es el peso específico del agua.

2.3.4 Análisis de infiltración en presas de relave

Para el análisis de filtraciones se consideran dos estados: flujo estacionario o permanente y flujo transitorio. Flujo estacionario o permanente es aquel en el cual las características del flujo de agua a través del suelo no varían en el tiempo, por ejemplo: flujo a través de una presa de tierra, después del llenado (se mantiene la altura del agua constante en el tiempo). Flujo transitorio es aquel en el cual las características del flujo de agua a través del suelo varían en el tiempo, por ejemplo: el fenómeno de consolidación de los suelos (Das, 2008). En los siguientes párrafos se describen las consideraciones encontradas en la literatura revisada para una presa de relaves.

Vick (1983), mencionado en Pak y Nabipour (2017), indica que en las presas de relaves la configuración de las redes de flujo es diferente con respecto a las presas de agua. En las presas de relave, especialmente en aquellas construidas con el método aguas arriba, las líneas de flujo son cóncavas hacia abajo; mientras que, en las presas convencionales son cóncavas hacia arriba.

MacGregor et al. (2014) indica que el caudal de infiltración va a depender de la permeabilidad de los relaves, el suelo o roca en la fundación, el clima, la operación del depósito, etc. Indican también que las filtraciones van a ocurrir en todas las direcciones por lo tanto sugiere que por lo menos se hagan varios análisis de las infiltraciones que ocurrirán a través y debajo de la presa.

2.3.5 Programa de cómputo Seep/W

Geo- Slope International Ltd. (2012) indica que el software Seep/W usa elementos finitos para resolver las ecuaciones que gobiernan el flujo a través del suelo. La data que el software necesita de input es la geometría de la estructura, las condiciones de borde y las propiedades hidráulicas de los materiales.

El método de elementos finitos discretiza el medio continuo en un número finito de partes denominados elementos, en cada elemento se distinguen los nodos. Los nodos son puntos de unión con los elementos adyacentes. Dentro de los elementos y nodos se realizan ecuaciones que permiten obtener soluciones a los problemas numéricos a partir de valores conocidos. Este es un proceso iterativo que se repite en los elementos que conforman la malla. Los valores conocidos se establecen cuando se determinan las condiciones de borde. Geo-Slope en el manual "Seepage modeling with SEEP/W" explica a detalle la teoría involucrada (Geo-Slope International Ltd., 2012).

2.4 FILTRACIONES Y DRENES

2.4.1 Efecto de las filtraciones en las presas

Pak y Nabipour (2017) menciona los aspectos de las filtraciones que afectan la estabilidad de una presa de almacenamiento de relaves, los cuales son: la ubicación del nivel freático, los efectos de la franja capilar y los efectos de la zona no saturada sobre el nivel freático.

Tanchev (2014) en su libro "Dams and appurtenant hydraulic structures" indica los efectos que las filtraciones pueden causar en las presas, los cuales son: pérdida de agua almacenada, transporte de las partículas del suelo y erosión mecánica.

La presión de poros en el cuerpo y en la fundación de la presa es también un efecto de las filtraciones (MacGregor et al., 2014).

Las presiones en la base de la presa, llamadas también subpresión, son fuerzas que tienen un efecto desestabilizador debido a que disminuye el peso de la presa y reduce su resistencia contra la acción de las fuerzas horizontales (Tanchev, 2014).

Los mecanismos de erosión consisten básicamente en el transporte de las partículas del suelo que conforman la fundación o el cuerpo de la presa, lo cual conduce a un debilitamiento de la fundación y del cuerpo de la presa (Tanchev, 2014). La tubificación, erosión interna, tunelado, sufusión y flotación son tipos de los mecanismos de erosión según indica Richards y Reddy (2017), en Fernández y López (2016).

2.4.2 Medidas de control de las filtraciones

El cuerpo de la presa y la fundación deben cumplir con medidas de control, de tal modo que se mantengan las presiones de poros en un nivel adecuado para mantener la estabilidad del talud y que la erosión interna, que podría formar tubificación y causar la falla de la presa, no ocurra (MacGregor et al., 2014).

Con el objetivo de cumplir lo mencionado anteriormente se usan las siguientes medidas: disposición de los relaves en la playa, zonificación de la presa, drenes y zonas con alta capacidad de descarga. En la figura 4 se muestran las medidas de diseño comúnmente usadas (MacGregor et al., 2014).

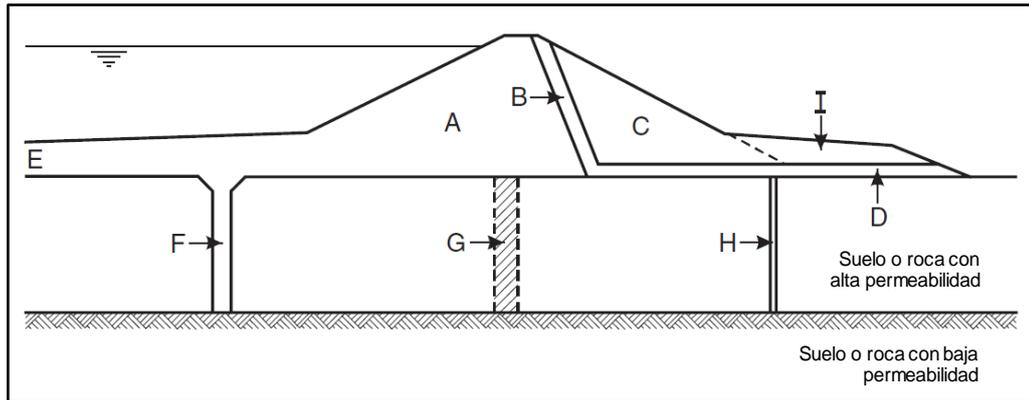


Figura N° 4 Medidas en el diseño para el control de las filtraciones y erosión a través y debajo del cuerpo de la presa con fundaciones altamente permeables. A, núcleo de baja permeabilidad; B, filtro/dren chimenea; C, zona aguas abajo; D, filtro/dren horizontal; E, colchón aguas arriba con baja permeabilidad; F, zanja; G, pantalla de impermeabilización; H, pozos; I, berma.

Fuente: MacGregor et al., 2014.

2.4.3 Filtros y drenes

FEMA (2011) indica que los términos filtro y dren tienen diferentes significados según los autores que lo usan, algunos autores hacen referencia a un dren como filtro y viceversa, otros usan el término filtro/ dren. Un material de filtro/dren cumple con dos funciones: retención de las partículas y drenaje. Según esta definición FEMA usa el término filtro cuando el material cumple principalmente la función de retención de partículas y usa el término dren cuando el material principalmente cumple la función de drenaje, en ambos casos el material cumple las dos funciones.

Los drenes, llamados también sistemas de drenes, pueden ser estructuras en forma de pozas en la fundación o también pueden ser parte del cuerpo de la presa, insertado en una capa o dos capas de arena, grava u otro material permeable. Estas capas pueden tener una disposición horizontal, vertical o inclinada (Tanchev, 2014).

La función de los sistemas de drenaje es coleccionar y conducir el agua hacia aguas abajo de la presa. En este proceso influyen la velocidad de la filtración y la magnitud de las presiones de las filtraciones. La colección del flujo es a través de las fisuras, producidas debido a los asentamientos diferenciales, fractura

hidráulica o por desecación (Tanchev, 2014). Adicionalmente, el uso de filtros y drenes permite controlar la presión de poros, la erosión interna y la tubificación. (MacGregor et al., 2014).

Para cumplir las funciones mencionadas los sistemas de drenes deben tener mayor permeabilidad en comparación a cualquier otra capa en la presa o la fundación. Cuando la zona de dren o filtro tiene menor permeabilidad que las capas adyacentes entonces la presión de agua se incrementa en estas capas con mayor permeabilidad. Esta condición insegura existe también si el sistema de drenaje no tiene suficiente capacidad para conducir el volumen del agua infiltrada (FEMA, 2011).

2.5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Según indica Lottermoser (2007), en Knight (2015), “la pendiente del talud, las propiedades del material, la naturaleza de la fundación, el grado de compactación, el régimen hidráulico dentro y alrededor de la presa influyen en la estabilidad de la presa”. Esta estabilidad de la estructura usualmente se verifica usando los métodos de equilibrio límite y métodos numéricos, como el método de elementos finitos (MacGregor et al., 2014).

Tanchev, (2014) indica que en una presa se debe realizar el análisis de los taludes aguas abajo y aguas arriba para las condiciones más críticas. Las condiciones críticas de estabilidad de la presa indicadas son: al final de la construcción, durante la operación con un flujo estacionario establecido (llamado también condición de servicio) y durante el desembalse rápido. Para una presa de tierra, las condiciones más críticas para el talud aguas arriba son al final de la construcción y durante el desembalse rápido, para el talud aguas abajo son al final de la construcción y durante la operación.

2.5.1 Métodos de equilibrio límite

Los métodos de equilibrio límite evalúan la estabilidad de los taludes asumiendo una superficie de falla, la estabilidad contra el deslizamiento es expresada a través

del factor de seguridad, ecuación (22). El factor de seguridad es un valor adimensional que resulta de dividir las fuerzas resistentes al deslizamiento y las fuerzas que tienden a desequilibrar la masa en la superficie de falla, estas fuerzas se calculan mediante equilibrio límite. El método de equilibrio límite considera que el valor del factor de seguridad es constante en toda la superficie de falla (Tanchev, 2014; Knight, 2015).

$$FS = \frac{\text{Esfuerzo cortante resistente del suelo}}{\text{Esfuerzo cortante actuante en la superficie de falla}} \quad (22)$$

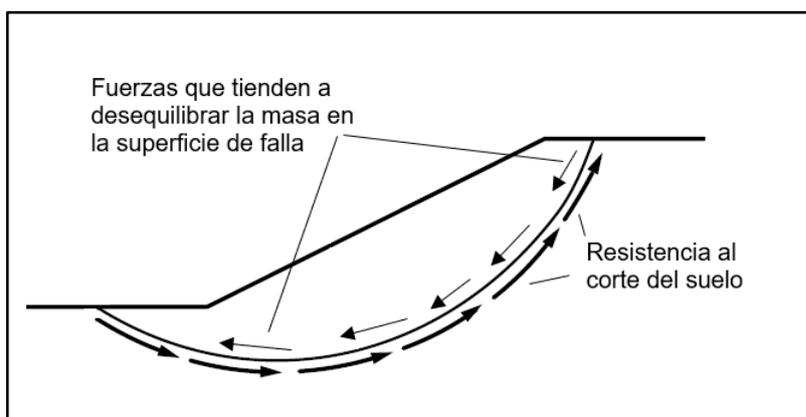


Figura N° 5 Fuerzas consideradas en una falla circular.

Fuente: Tanchev, 2014.

Tanchev (2014) indica que, para determinar la superficie de falla, la cual tiene el menor factor de seguridad, es necesario examinar un número de superficies posibles de deslizamientos en diferentes posiciones. La superficie de falla comúnmente aplicada es la superficie rotacional, el cual puede ser circular (fig. 6 a) o curva (fig. 6 b). La superficie de deslizamiento puede ser también en bloque (fig. 6 c), o la combinación de una superficie rotacional circular y plana. Las superficies de falla circulares aparecen en un medio homogéneo, mientras que la superficie curva aparece en un medio no homogéneo. Los deslizamientos a través de bloque o combinaciones aparecen cuando la presa ha sido construida con zonas que tienen diferentes propiedades, o cuando la capa superior del estrato de la fundación consiste de un material no rocoso (Tanchev, 2014).

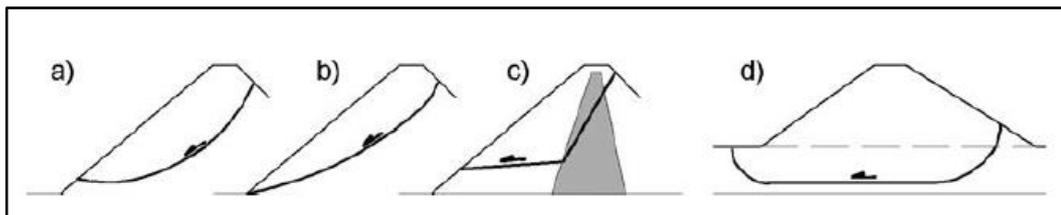


Figura N° 6 Diferentes formas de superficies de deslizamiento

Fuente: Tanchev, 2014.

En la tabla N° 4 se muestran los diferentes métodos del equilibrio limite y sus características. La principal diferencia entre estos métodos son los valores que se asumen, debido a que los problemas son estáticamente indeterminados, es decir el número de ecuaciones de equilibrio es menor que el número de variables no conocidas (MacGregor et al., 2014).

Tabla N° 4 Características de los métodos de equilibrio para el análisis de taludes.

Métodos Analíticos	Características
Tablas de estabilidad de taludes (Janbu, 1968; Duncan, et al., 1987)	Lo suficiente preciso para algunos propósitos de estimaciones iniciales. Más rápido que los análisis detallados de computadora.
Método ordinario de dovelas (Fellenius, 1927)	Solo para superficies de falla circulares. Satisface el equilibrio de momentos. No satisface el equilibrio de fuerzas horizontales y verticales. En la mayoría de los casos subvalora el valor del factor de seguridad.
Método modificado de Bishop (Bishop, 1955)	Solo para superficies de falla circulares. Satisface el equilibrio de momentos. Satisface el equilibrio de las fuerzas verticales. No satisface el equilibrio de las fuerzas horizontales.
Método de equilibrio de fuerzas (e.g. Lowe y	Para cualquier forma de superficie de falla. No satisface el equilibrio de momentos.

Karafiath, 1960, y U.S. Corps of Engineers, 1970)	Satisface el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales.
Procedimiento generalizado de superficies de Janbu (Janbu, 1968)	Para cualquier superficie de falla. Satisface todas las condiciones de equilibrio. Permite que la ubicación de las fuerzas laterales varíe. Problemas numéricos más frecuentes que en otros métodos.
Método de Morgenstern y Price (Morgenstern y Price, 1965)	Para cualquier superficie de falla. Satisface todas las condiciones de equilibrio. Permite que la ubicación de las fuerzas laterales varíe.
Método de Spencer (Spencer, 1967)	Para cualquier superficie de falla. Satisface todas las condiciones de equilibrio. Se asume que las fuerzas laterales son paralelas.

Fuente: Traducido de MacGregor et al., 2014.

MacGregor et al. (2014) indican lo siguiente: el método ordinario de Fellenius no debe ser usado, debido a que los factores de seguridad obtenidos son bajos en comparación a los valores obtenidos con los otros métodos mencionados en la tabla N° 4. Whitman and Bailey (1967), en MacGregor et al. (2014), indica que el método modificado de Bishop es exacto para superficies circulares; para superficies no circulares los métodos de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967) son comúnmente empleados, Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967) mencionado en MacGregor et al. (2014).

El Comité Nacional Australiano de Grandes Presas (ANCOLD, 2012), en Knight (2015), menciona que el factor de seguridad para una presa depende de lo siguiente: consecuencias de la falla, propiedades del material y condiciones de la fundación. No hay reglas que indiquen que constituye un factor de seguridad aceptable. En la tabla N° 5 se incluyen valores recomendados del mínimo factor de seguridad para presas de relave bajo diferentes condiciones de carga.

Tabla N° 5 Valores del factor de seguridad recomendados para presas de relave.

Condiciones de carga	Recomendaciones del factor de seguridad mínimo	Esfuerzo cortante usado para la evaluación
A largo plazo, condiciones drenadas.	1.5	Efectivo
A corto plazo, condiciones no drenadas (pérdida potencial de confinamiento).	1.5	Consolidado, no drenado
A corto plazo, condiciones no drenadas (pérdida no potencial de confinamiento).	1.3	Consolidado, no drenado

Fuente: ANCOLD, 2012. Mencionado en Knight,, 2015.

2.5.2 Condiciones de carga

MacGregor et al. (2014), indica que es importante determinar si los esfuerzos totales (condiciones no drenadas) o esfuerzos efectivos (condiciones drenadas) serán usados para el cálculo del esfuerzo resistente al corte del suelo. El autor sugiere también que de existir duda con respecto a que condición debe ser tomada, se debe realizar el análisis considerando ambas condiciones y se toma en cuenta el caso más desfavorable.

Condiciones no drenadas

Knight (2015), menciona que las condiciones no drenadas ocurren en el corto tiempo cuando no hay suficiente tiempo para disipar el exceso de presión de poros. El criterio de falla de Mohr Coulomb puede ser expresado por la ecuación (23) en términos de esfuerzos totales, usando parámetros en condiciones no drenadas c_u y ϕ_u (Das y Sobhan, 2013).

$$\tau_f = c_u + \sigma \tan \phi_u \quad (23)$$

Donde:

τ_f = esfuerzo cortante en la falla

c_u = cohesión no drenada

σ = esfuerzo normal

ϕ_u = ángulo de fricción no drenado

Las condiciones no drenadas consideran un ángulo de fricción igual a 0° , lo cual significa que el esfuerzo cortante es igual a la cohesión, ecuación (24) (Saad, 2013).

$$\tau_f = c_u \quad (24)$$

La razón para usar las condiciones no drenadas es la dificultad para calcular exactamente la presión de poros. Para el análisis se usan las condiciones no drenadas o esfuerzos totales en los siguientes casos: al final de la construcción, durante el desembalse rápido y durante la construcción (MacGregor et al., 2014).

Condiciones drenadas

El análisis en condiciones drenadas es conducido en términos de esfuerzo efectivo y usa los parámetros de esfuerzo cortante drenado c' y ϕ' (Das y Sobhan, 2013). El criterio de falla de Mohr- Coulomb para el esfuerzo cortante en términos del esfuerzo efectivo se expresa en la ecuación (26) (Knight, 2015).

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (25)$$

$$\sigma' = \sigma - u \quad (26)$$

Donde el esfuerzo efectivo (σ') está dado mediante la diferencia entre el esfuerzo normal (σ) y la presión de poros del agua (u).

Las condiciones drenadas tienen la ventaja que el monitoreo de la presión de poros ayuda en la evaluación de la estabilidad, se usan los esfuerzos efectivos en los siguientes casos: durante la operación y a largo plazo (MacGregor et al., 2014).

2.5.3 Programa de cómputo Slope/W

Los métodos de análisis que usa el programa son: métodos de dovelas de Bishop modificado, Janbu simplificado, Spencer y Mongenstern y Price (Geo-Slope International Ltd., 2012).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

En el presente capítulo se explica la metodología utilizada en la investigación realizada. Para el estudio se tomó como referencia las características de una presa de almacenamiento de relaves existente y en operación, cuyo nombre y ubicación debido a temas de confidencialidad no pueden ser mencionados. En adelante se hará referencia a esta presa con el nombre de “presa existente”.

En primer lugar, en el presente capítulo se describe la zona en estudio, seguidamente se explican los pasos seguidos para la construcción del modelo numérico de la presa existente. Luego se explica el análisis de infiltración, la calibración del modelo y el análisis de estabilidad realizado. Se realizó el análisis de infiltración considerando flujo permanente y el análisis de estabilidad física del talud aguas abajo en condiciones estáticas. Para estos análisis se usaron los softwares Seep/w y Slope/w, respectivamente.

Una vez concluidos los análisis realizados para el modelo numérico de la presa existente, se procedió a modificar el modelo numérico agregando un sistema de filtro que se extiende hacia aguas arriba en la sección de la presa, para este nuevo modelo numérico que en adelante se denominará “modelo numérico modificado” se procedió a realizar el análisis de infiltración y el análisis de estabilidad.

Finalmente, en el modelo numérico modificado se procedió a realizar el análisis de sensibilidad. En el análisis de sensibilidad se estudian dos variables principales: la longitud del filtro hacia aguas arriba y la altura de la presa.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO

La cimentación del depósito de relaves en estudio está compuesta por rocas sedimentarias (calizas y margas) cubiertas por depósitos cuaternarios. Los materiales que conforman la sección a analizar son el basamento rocoso, depósito fluvio glacial denso, depósito fluvio glacial medio, material de la presa existente y relave (ver figura N° 7).

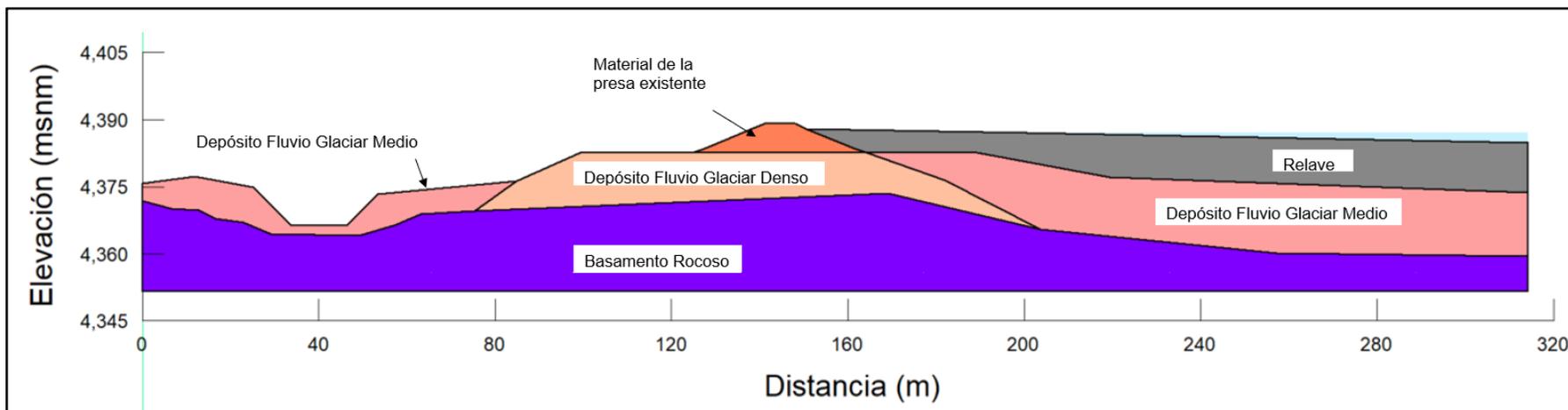


Figura N° 7 Sección del depósito de relaves en estudio

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen los materiales que conforman la sección a analizar y en la tabla N° 6 se muestran las propiedades de los materiales.

Basamento rocoso

Caliza ligeramente fracturada, resistencia media a alta (40 a 100 MPa), permeabilidad 3.7×10^{-6} cm/s.

Depósito fluvioglacial denso

Grava limo arcillosa densa, permeabilidad de 6.2×10^{-6} cm/s.

Depósito fluvioglacial medio

Grava limo arcillosa de compacidad media y permeabilidad de 8.2×10^{-6} cm/s.

Material de la presa existente

El material usado en el cuerpo de la presa y en el crecimiento de la presa por el método aguas abajo es el desmonte de mina. Este material está conformado por grava limo arcillosa con arena, medianamente densa a densa, cuya permeabilidad es de 2.6×10^{-4} cm/s.

Relaves

Los relaves provienen de una mina de tipo polimetálica (plata, plomo y zinc), son transportados mediante tuberías hasta el depósito de relaves y descargados desde varios puntos ubicados en la cresta. El relave es un material limo arenoso con densidad seca igual a 14.7 kN/m^3 . La concentración de sólidos en la tubería de descarga es de 20.2%.

Tabla N° 6 Propiedades de los materiales de la presa existente

Material	Color	Peso unitario γ_{sat} (kN/m ³)	Peso unitario γ_{seco} (kN/m ³)	Esfuerzos efectivos		k (cm/s)	Descripción
				Cohesión c' (kPa)	Fricción ϕ' (°)		
Material de la presa existente		21.3	18.5	0	36	2.6×10^{-4}	Grava limo arcillosa con arena. Clasificación SUCS GC-GM
Depósito Fluvio Glaciar Denso		23	21	0	34	6.2×10^{-6}	Grava limo arcillosa densa
Depósito Fluvio Glaciar Medio		21.6	19	0	33	8.2×10^{-6}	Grava limo arcillosa media
Relave		20	14.7	0	30	7.3×10^{-5}	Limo arenoso. Clasificación SUCS SM
Basamento Rocoso		26	25.8	6000	42	3.7×10^{-6}	Caliza ligeramente fracturada
Sistema de filtro		21.6	19	0	37	10	Grava bien gradada con arena. Clasificación SUCS GW

Nota:

Los materiales se consideran homogéneos e isotrópicos.

Fuente: Elaboración propia

La tabla N°6 incluye también las propiedades del sistema de filtro, este material no es parte de la presa existente, por lo cual sus propiedades se toman de referencia del artículo de investigación "Comparative Stability Analysis of Tailings Storage Facilities" hecho por Mosquera et al. (2013).

3.1.1 Obtención de las propiedades de los materiales

Los valores mostrados en la tabla N°6 son los resultados de una investigación geotécnica desarrollada por la empresa que diseñó la presa de relaves existente. Esta investigación consistió en observaciones in situ, ensayos de campo y de laboratorio. A continuación, se procede a describir de manera resumida como se desarrolló la investigación geotécnica y los valores obtenidos.

En campo se realizaron calicatas, perforaciones geotécnicas, ensayos de densidad in situ, ensayos SPT, LPT, ensayos de permeabilidad tipo Lugeon y Lefranc.

Calicatas

La profundidad de las excavaciones de las calicatas que se realizaron varió entre 0.6 m y 5.1 m. En cada calicata se hizo un registro de la estratigrafía de los materiales, ensayos de densidad in-situ y toma de muestras para los ensayos de laboratorio.

Los materiales encontrados en las calicatas corresponden a suelos cuaternarios de origen fluvio glacial los cuales están conformados por gravas limo arcillosas.

Perforaciones geotécnicas

Las perforaciones se realizaron con una máquina perforadora. Las profundidades de perforación variaron entre 13.5 m y 51 m. Durante las perforaciones se realizaron ensayos SPT, LPT, ensayos de permeabilidad tipo Lugeon y Lefranc. Se tomaron también muestras físicas para los ensayos de laboratorio.

En las perforaciones se identificó depósitos fluvio glaciares cuyo espesor va desde los 3 m a 15 m. El basamento rocoso detectado consiste en calizas ligeramente fracturadas. Se encontró también depósitos cuaternarios conformados por gravas limo arcillosas de compacidad medianamente densa a densa.

Ensayos de densidad in-situ

Los ensayos de densidades in-situ fueron ejecutadas mediante el método de reemplazo de agua. Los resultados indican que el peso unitario de los materiales varía entre 1.65 g/cm³ y 2.5 g/cm³.

Ensayos SPT y LPT

Los ensayos SPT (Standard Penetration Test) y LPT (Large Penetration Test) se realizaron para determinar la compacidad y resistencia de los materiales de fundación.

Ensayos de permeabilidad en perforaciones

Se ejecutaron ensayos tipo Lefranc en el tramo correspondiente al suelo, luego se realizaron ensayos tipo Lugeon en la roca. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

- Para el depósito fluvio glacial conformado por grava mal gradada con presencia de limos y arcillas se obtuvieron valores de permeabilidad máximos de 2.7×10^{-4} cm/s y mínimos de 1.6×10^{-7} cm/s.
- En la roca (caliza ligeramente fracturada) los valores de permeabilidad alcanzaron valores máximos de 3.2×10^{-3} cm/s y mínimos de 3.7×10^{-7} cm/s.

Ensayos de laboratorio

Se realizaron ensayos de laboratorio a las muestras de suelo, roca, relave y al material del cuerpo de la presa. Los ensayos que se ejecutaron fueron los siguientes: contenido de humedad, análisis granulométrico, límite de Atterberg, clasificación SUCS, densidad natural y contenido de humedad, gravedad específica, triaxial consolidado drenado, triaxial consolidado no drenado, corte directo, compresión simple en suelos, consolidación, proctor modificado, durabilidad utilizando el sulfato de magnesio y abrasión Los Angeles. Los ensayos realizados a las rocas fueron: compresión uniaxial y propiedades físicas.

Para los relaves se determinó el contenido de sólidos, contenido de humedad y viscosidad del flujo. Se realizaron también ensayos de permeabilidad y pruebas de sedimentación en condiciones no drenadas y drenadas

3.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE LA PRESA EXISTENTE

El modelo numérico se construyó utilizando el programa Seep/w. Para este fin, primeramente, se dibujó a escala la geometría de la sección transversal del depósito de relaves evaluado, seguidamente se asignó los materiales a las

regiones de la geometría dibujada, luego se asignó las condiciones de borde, finalmente se revisó y ajustó la malla de elementos finitos.

3.2.1 Geometría de la sección transversal evaluada

En el programa Seep/w se procedió a dibujar la geometría de la sección transversal del depósito de relaves evaluado. Esta sección transversal incluye el dibujo de la geometría de la presa existente y de las regiones geométricas que representan los materiales que conforman la sección transversal. Ver figuras N° 8 y 9, respectivamente.

La sección de la presa existente tiene las siguientes características geométricas: la altura de la presa es de 6.5 m (la cota de la cresta de la presa es 4389 msnm), el talud aguas arriba es de 2.5 H: 1V, el talud aguas abajo es de 2.5 H:1 V, la cresta de la presa de relave está 2 metros por encima del nivel del vaso, el ancho de la cresta es de 7 m, el ancho de la base es de 39.5 m, la longitud de la playa de relaves es de 50 m y la pendiente de la playa es de 2% (ver figura N° 8).

Para el análisis de estabilidad e infiltración realizados se ha considerado la condición más conservadora; es decir, cuando la longitud de la playa de relaves es igual a 0 m.

3.2.2 Asignación de los materiales en el modelo numérico

Continuando con la construcción del modelo numérico, se procedió a asignar los materiales a las regiones dibujadas. Antes de asignar los materiales a cada región, se definió los materiales en el programa, se introdujo las propiedades y se asignó un color a cada tipo de material. Luego se procedió a asignar los materiales a las regiones dibujadas, según lo mostrado en la figura N° 10.

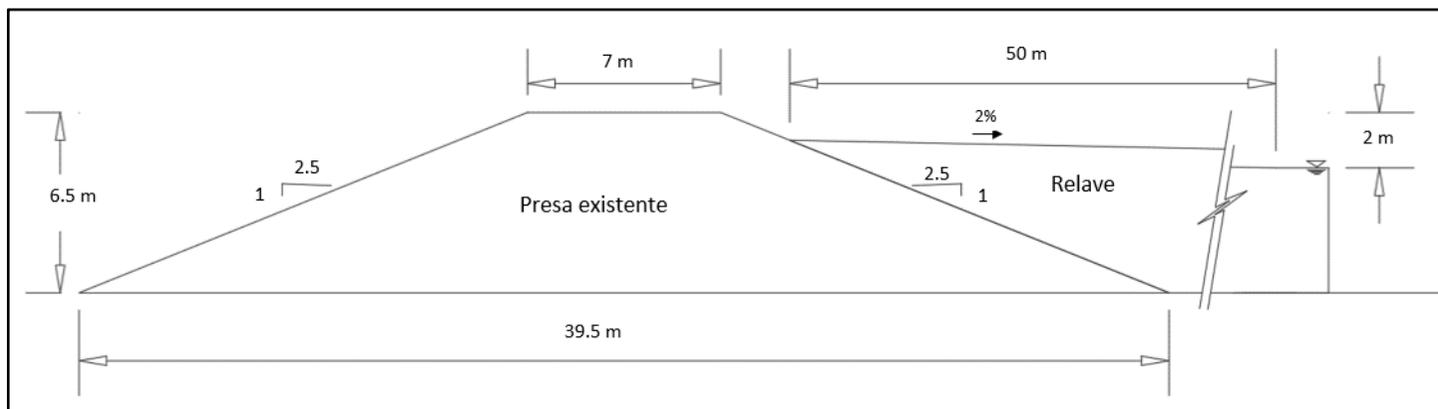


Figura N° 8 Sección transversal de la presa existente

Fuente: Elaboración propia

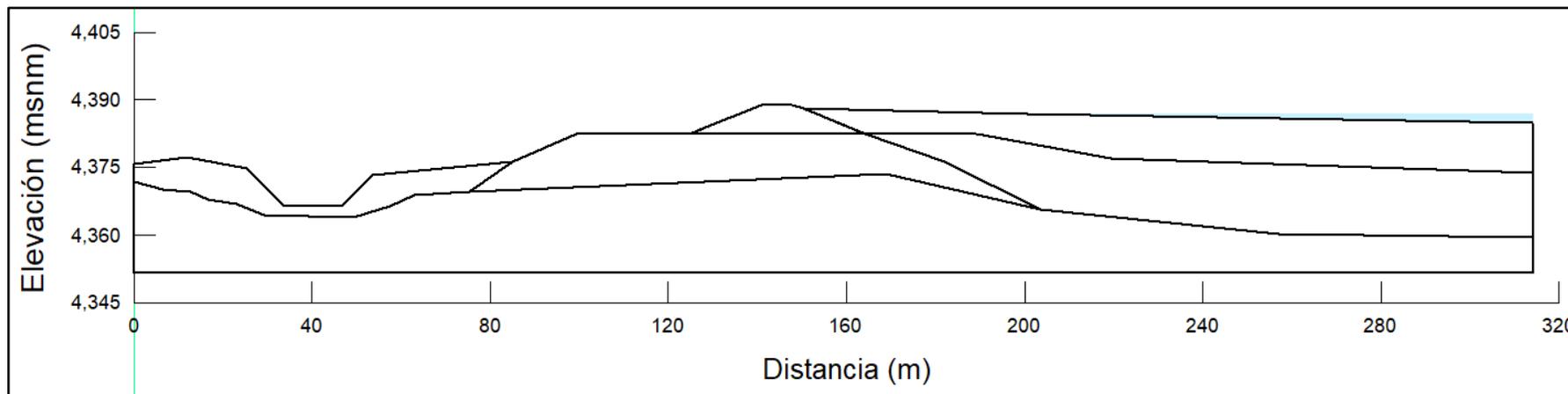


Figura N° 9 Regiones que conforman la sección transversal del depósito de relaves evaluado.

Fuente: Elaboración propia

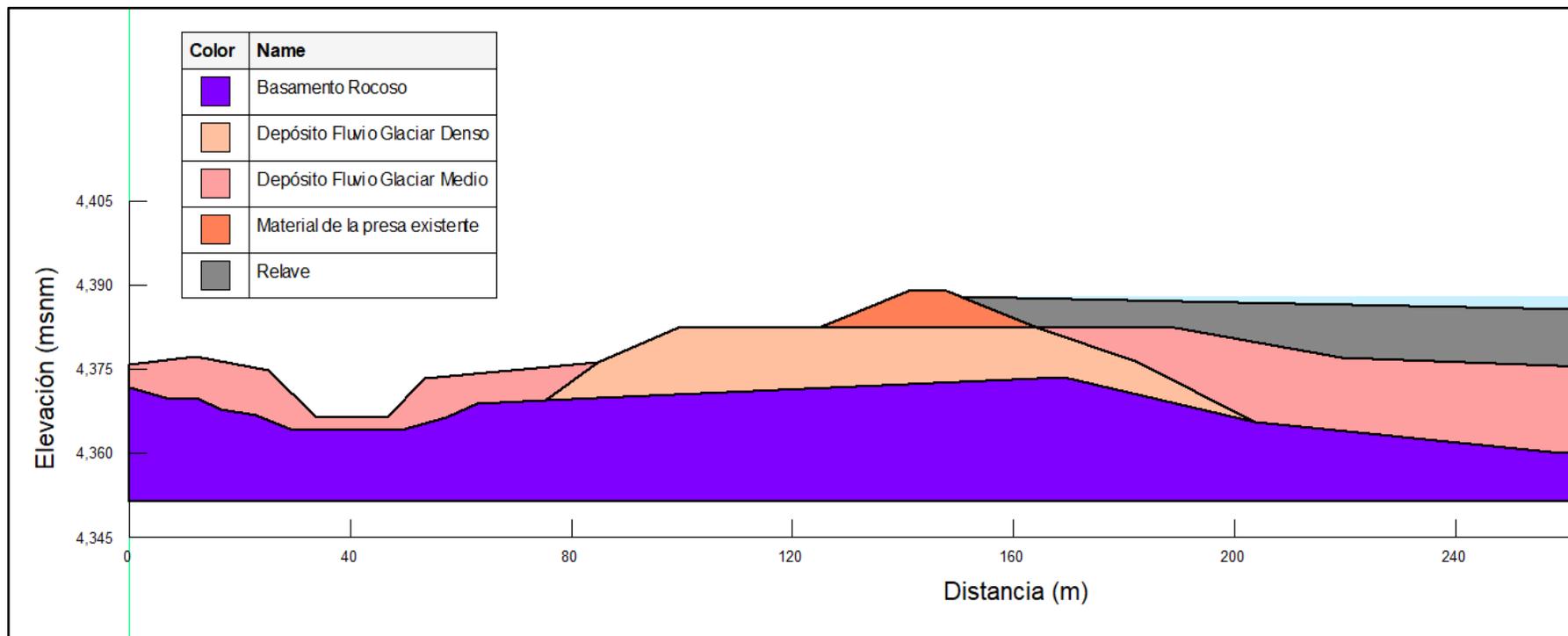


Figura N° 10 Asignación de los materiales a las regiones dibujadas.

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Condiciones de borde para el análisis de infiltración

En el modelo se establecieron dos condiciones de borde:

Condición de borde 1: nivel del espejo del agua en el vaso, 4388 msnm. Esta condición se representa con la línea azul en la figura N° 11.

Condición de borde 2: consiste en dibujar una línea en la superficie por la cual probablemente sale el flujo. De esta forma el programa se encarga de determinar el tramo en la línea que representa la ubicación de la salida del flujo. Esta condición se representa con la línea guinda en la figura N° 11.

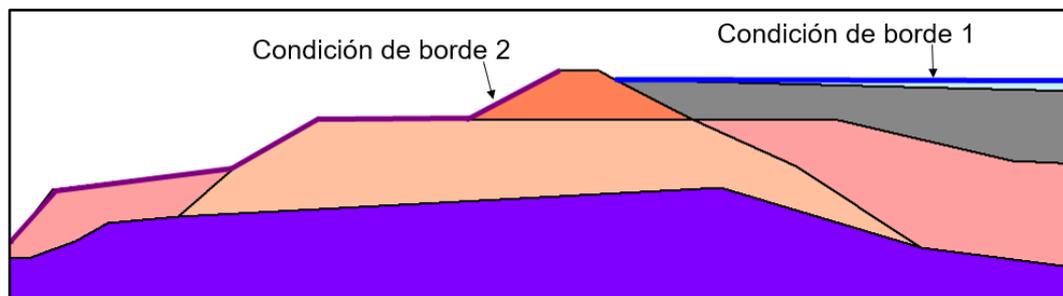


Figura N° 11 Condiciones de borde para el análisis de infiltración

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Malla de elementos finitos

Para el análisis en el programa Seep/W la geometría de la presa se dividió en una malla de 4291 elementos y 4493 nodos, el tamaño de los elementos es de 1.5 m. La malla se dividió en elementos triangulares y cuadrangulares no estructurados, es decir estos no presentan un patrón de conectividad predeterminado (ver figura N° 12).

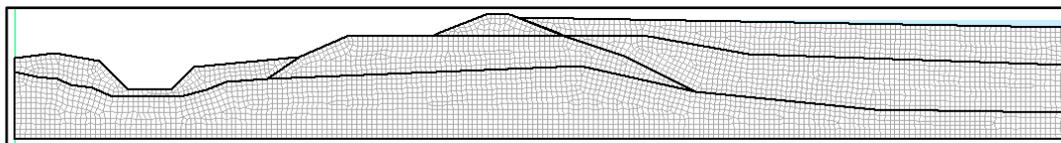


Figura N° 12 Malla de elementos finitos, elementos triangulares y cuadrangulares.

Fuente: Elaboración propia

3.3 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN DE LA PRESA EXISTENTE

Se procedió a correr el programa Seep/W, considerando un flujo permanente. Como resultados se obtuvo la ubicación del nivel freático y las presiones de poros con lo cual se realizó el análisis de estabilidad de la presa.

3.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO DE LA PRESA EXISTENTE

Para la calibración del modelo se comparó la cota real de salida del flujo con la cota de salida obtenido del análisis de infiltración, ver figura N° 13. La cota real de salida del flujo en el talud aguas abajo fue de 4382.5 ± 0.04 msnm y la cota de salida del flujo obtenida en el análisis matemático fue de 4382.5 msnm. Por lo tanto, el modelo matemático guarda una relación con el modelo real.

Las condiciones de borde consideradas para este análisis fueron las siguientes: nivel del espejo de agua 4387 msnm y longitud de la playa de relaves igual a 50 m.

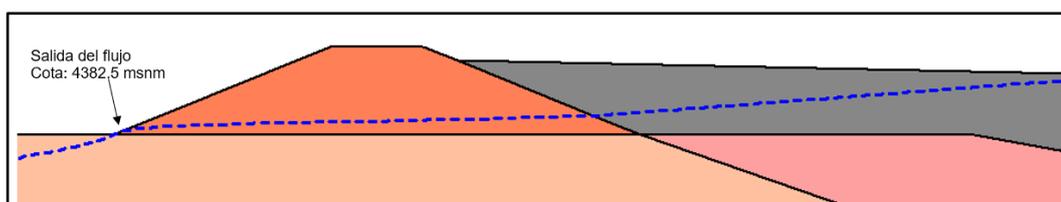


Figura N° 13 Ubicación de la salida del flujo.

Fuente: Elaboración propia

3.5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA PRESA EXISTENTE

Se realizó el análisis de estabilidad usando el software Slope/w del paquete Geoestudio, para realizar el análisis de estabilidad se usó el modelo construido en el Seep/w y se importó los resultados obtenidos en el Seep/w.

El software Slope/w muestra como resultados las probables superficies de falla y los valores del factor de seguridad. Para la presente investigación se buscó la superficie de falla crítica, la cual tiene el menor factor de seguridad al deslizamiento.

3.6 CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO NUMÉRICO MODIFICADO

A la geometría descrita en el ítem 3.2.1 se le agregó una nueva sección que representa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba, ver figura N°14. Este sistema de filtro tiene un espesor de 1 m colocado a lo largo de base de la presa y tiene una longitud de 25 m hacia aguas arriba. Se considera 1 m de espesor debido a que es el valor mínimo que recomienda la USBR (2007), se toma el valor mínimo debido a que el material es más costoso respecto al material del cuerpo de la presa (FEMA, 2011).

A las regiones de la geometría dibujada se les asignó las propiedades de los materiales descritos en la tabla N° 6, según lo mostrado en la figura N° 14. Posteriormente se estableció las condiciones de borde descritas en el ítem 3.2.3, seguidamente se revisó la malla de elementos finitos y finalmente se realizó el análisis de infiltración y estabilidad.

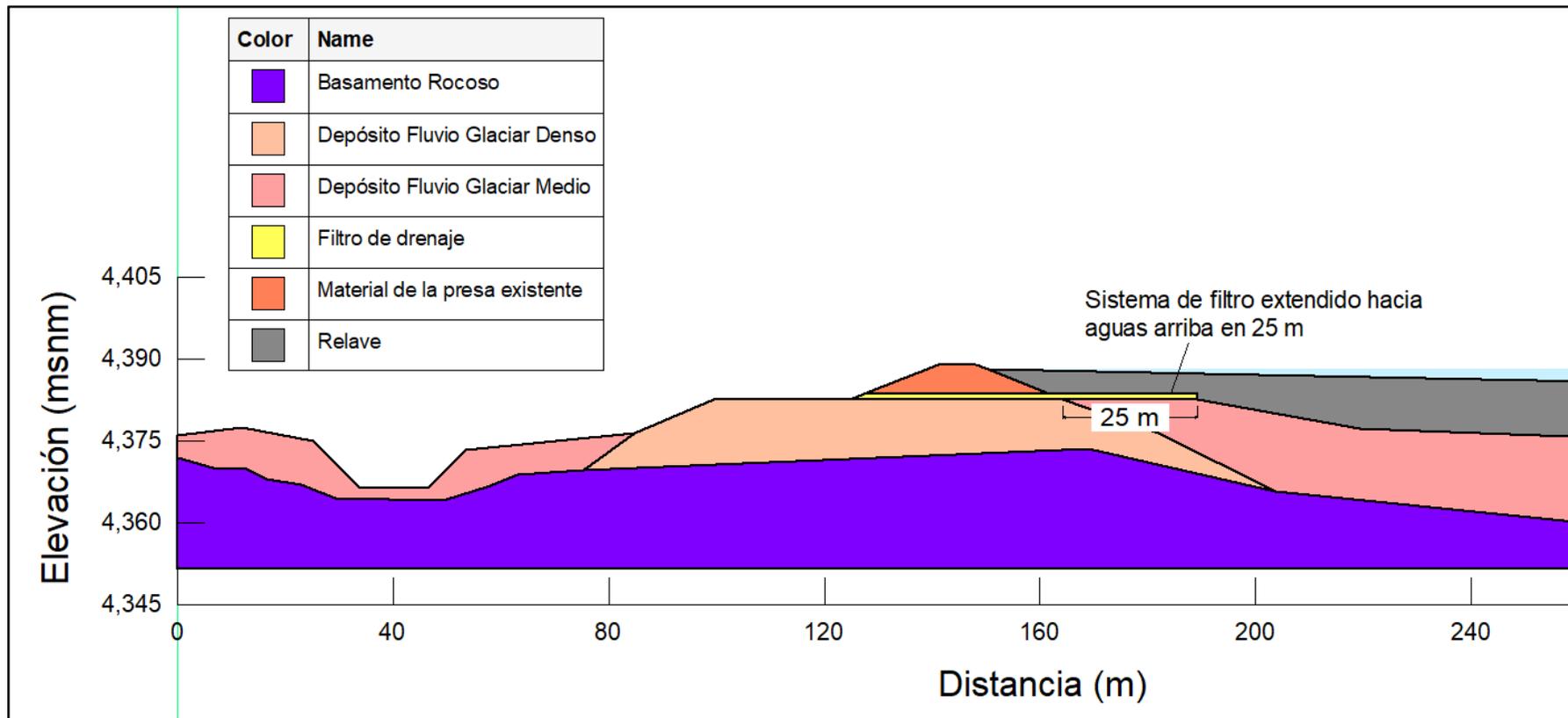


Figura N° 14 Regiones que conforman la sección transversal del depósito de relaves con el sistema de filtro.

Fuente: Elaboración propia

3.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se realizó para evaluar cómo influye la longitud del filtro extendido aguas arriba de la presa y la altura de la presa en el factor de seguridad de la presa.

Los valores usados para el análisis de sensibilidad fueron los siguientes:

- Los parámetros constantes son las propiedades mecánicas de los materiales mostradas en la tabla N° 6.
- Se consideró la longitud del filtro extendido como un parámetro variable, el rango de valores considerados es de 0 m a 25 m tal como se muestra en la figura N° 15 ($L_0 = 0$ m, $L_1 = 5$ m, $L_2 = 10$ m, $L_3 = 15$ m, $L_4 = 20$ m y $L_5 = 25$ m).

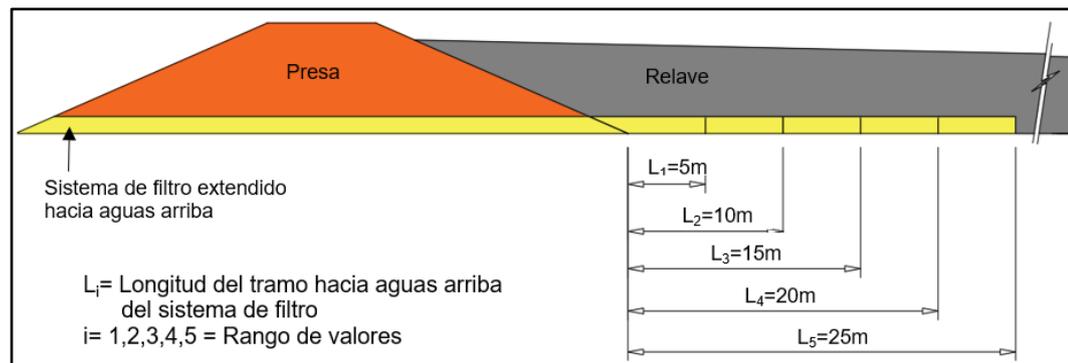


Figura N° 15 Longitudes del sistema de filtro extendido hacia aguas arriba L_1 , L_2 , L_3 , L_4 y L_5 .

Fuente: Elaboración propia

- Se consideró también la altura de la presa como un parámetro variable, el rango de valores considerados varía entre 6.5 m a 10.5 m ($H_1 = 6.5$ m, $H_2 = 7.5$ m, $H_3 = 8.5$ m, $H_4 = 9.5$ m y $H_5 = 10.5$ m), ver figura N° 16.

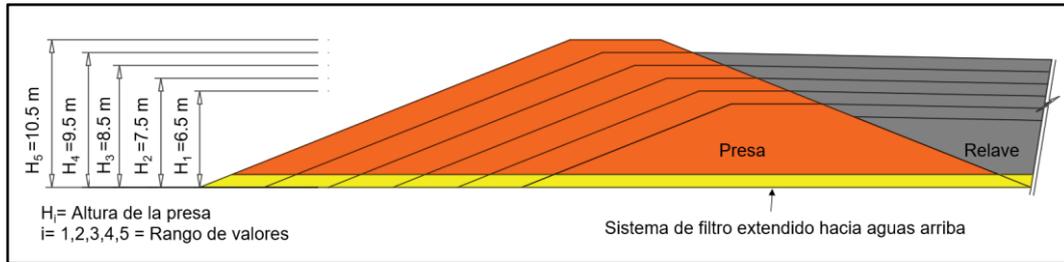


Figura N° 16 Alturas de la presa H_1 , H_2 , H_3 , H_4 y H_5 . Donde H es la altura de la presa en metros.
Fuente: Elaboración propia

Se realizaron un total de 30 simulaciones, considerando todos los posibles escenarios cuando se varían ambas variables, tal como se muestra en la tabla N° 7.

Tabla N° 7 Simulaciones consideradas en el análisis de sensibilidad.

Longitud de tramo hacia aguas arriba del sistema de filtro extendido	Altura de la presa				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
$L_0 = 0\text{ m}$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
$L_1 = 5\text{ m}$	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
$L_2 = 10\text{ m}$	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}
$L_3 = 15\text{ m}$	S_{16}	S_{17}	S_{18}	S_{19}	S_{20}
$L_4 = 20\text{ m}$	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}
$L_5 = 25\text{ m}$	S_{26}	S_{27}	S_{28}	S_{29}	S_{30}

S_i = Simulaciones
i = Número de simulación
i = [1:30]

Fuente: Elaboración propia

Para cada simulación se realizó el análisis de infiltración considerando flujo permanente, con los resultados del análisis de infiltración se procedió a realizar el análisis de estabilidad física para condiciones estáticas. De esta forma se calculó el factor de seguridad en el talud aguas abajo para cada simulación.

Las condiciones de borde consideradas en las simulaciones son las siguientes: longitud de la playa de relaves igual a 0 m, distancia entre el espejo de agua y la cresta de la presa igual a 1 m, el nivel del espejo de agua en el vaso varía dependiendo de la altura de la presa considerada. Los niveles considerados se muestran en la tabla N° 8.

Tabla N° 8 Condición de borde para las simulaciones.

Altura de la presa	Nivel del espejo de agua en el agua
$H_1 = 6.5 \text{ m}$	4388 msnm
$H_2 = 7.5 \text{ m}$	4389 msnm
$H_3 = 8.5 \text{ m}$	4390 msnm
$H_4 = 9.5 \text{ m}$	4391 msnm
$H_5 = 10.5 \text{ m}$	4392 msnm

Fuente: Elaboración propia

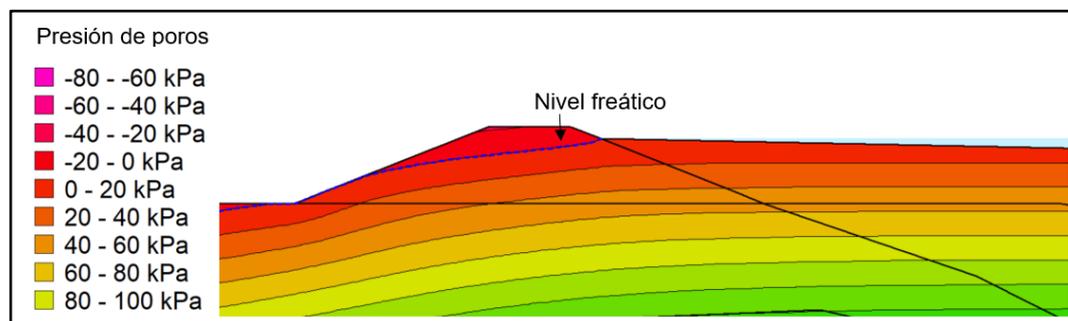
CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES

4.1 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN Y ESTABILIDAD DE LA PRESA EXISTENTE

Para el análisis de infiltración y estabilidad se consideraron las siguientes condiciones de borde: longitud de la playa de relaves igual a 0 m, distancia entre el espejo de agua y la cresta de la presa igual a 1 m, nivel del espejo de agua en el vaso igual a 4388 msnm. Se asumen estas condiciones de borde considerando el escenario más desfavorable o condición más conservadora, el cual sería después de una tormenta extrema.

Mediante el análisis de infiltración para un flujo permanente se determinó la posición del nivel freático para la presa existente, figura N° 17 A. La posición del nivel freático obtenido, que resultaría apareciendo en la cara del talud aguas abajo, es una condición no deseada en el diseño de la presa. Esto debido a que daría lugar a una posible tubificación y erosión en la cara del talud. Por ello es necesario un sistema de drenaje que deprima este nivel.

(A)



(B)

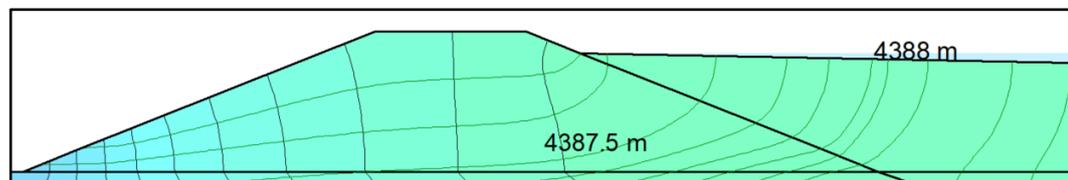


Figura N° 17 (A) Posición del nivel freático y presión de poros, resultado obtenido del análisis de infiltración de la presa existente. Longitud de la playa de relaves igual a 0 m. (B) Red de flujo.

Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 18 se muestra el resultado del análisis de estabilidad del talud aguas abajo en condiciones estáticas. El factor de seguridad obtenido es igual a 1.613. Este valor cumple con el mínimo requerido; sin embargo, la superficie crítica está casi completamente por debajo del nivel freático, lo cual es una condición no deseable en el diseño de las presas de tierra o relaves. Por ello se justifica proyectar un dren horizontal que deprima el nivel freático.

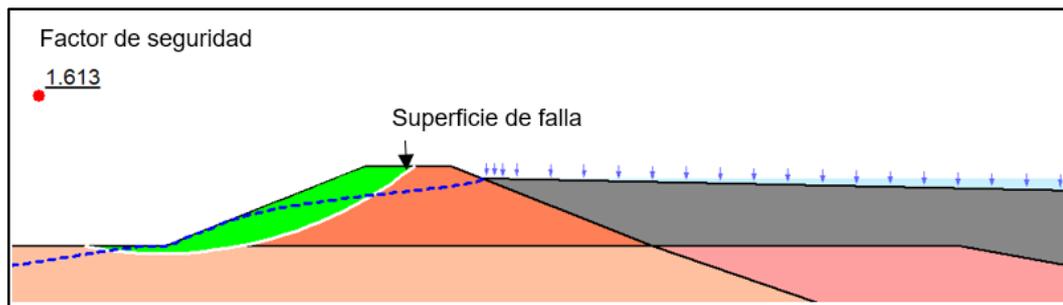


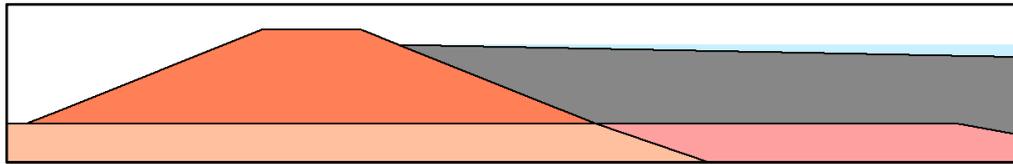
Figura N° 18 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa existente, obtenido del análisis de estabilidad física. Longitud de la playa de relaves igual a 0 m.

Fuente: Elaboración propia

4.2 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN Y ESTABILIDAD DE LA PRESA EXISTENTE CON EL SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO HACIA AGUAS ARRIBA

A la presa existente se procedió a agregar un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba tal como se muestran en las figuras 19 B.

(A)



(B)

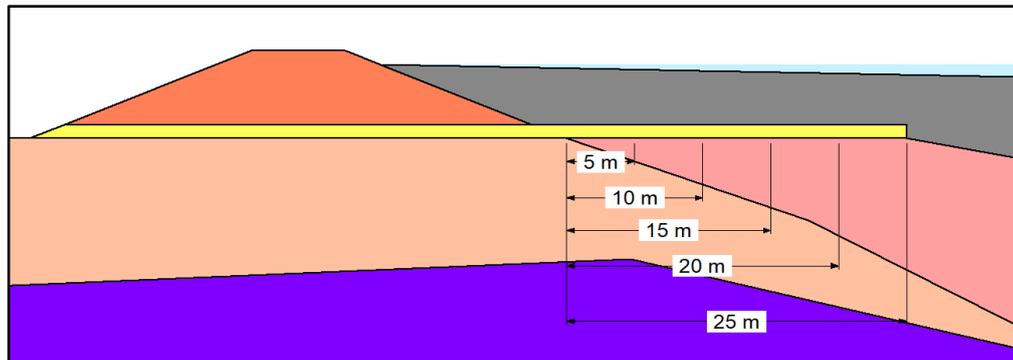
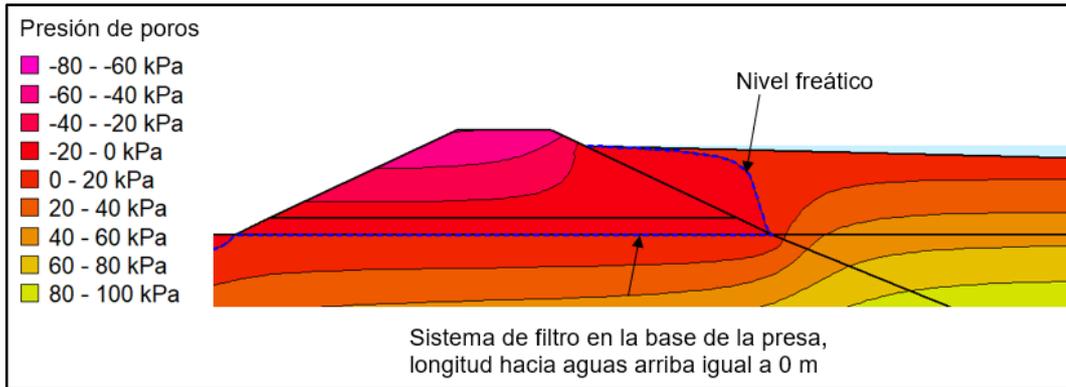


Figura N° 19 Presa existente (A) sin sistema de filtro, (B) con el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba.

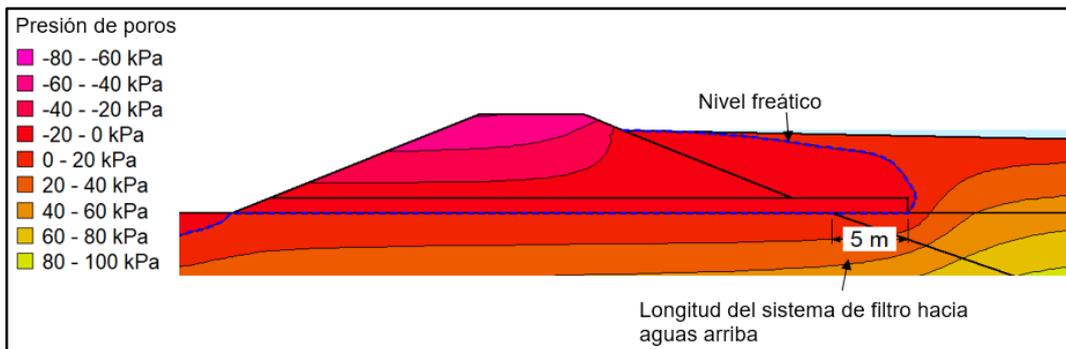
Seguidamente se realizó el análisis de infiltración y estabilidad considerando que la longitud hacia aguas arriba del sistema de filtro tiene los valores de 5 m, 10 m, 15 m, 20 m y 25 m.

Los resultados del análisis de infiltración se muestran en la figura N° 20. En estas figuras (A, B, C, D, E y F) se puede observar que a medida que la longitud de filtro se extiende hacia aguas arriba, se reduce la presión de poros en el relave que se encuentra por encima del filtro. Además, el nivel freático se aleja cada vez más del cuerpo de la presa. Esta presión de poros se reduce debido a que el sistema de filtro capta y direcciona el flujo, tal como se puede apreciar en las redes de flujo mostradas en la figura N°21 (A, B, C, D, E, F y G).

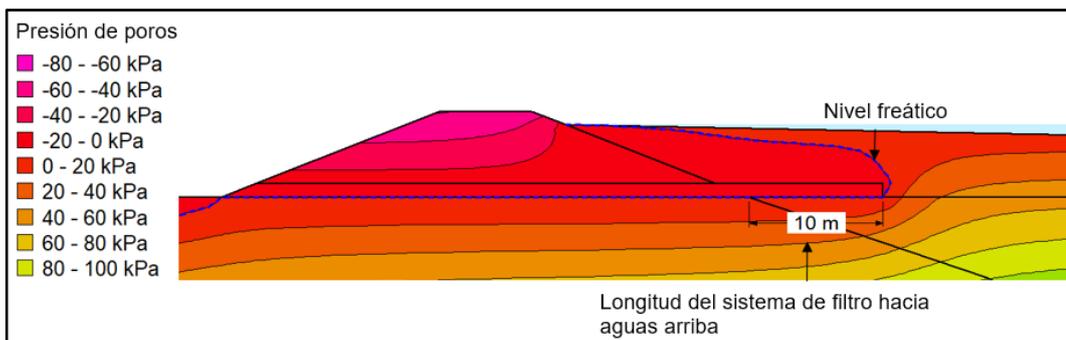
(A)



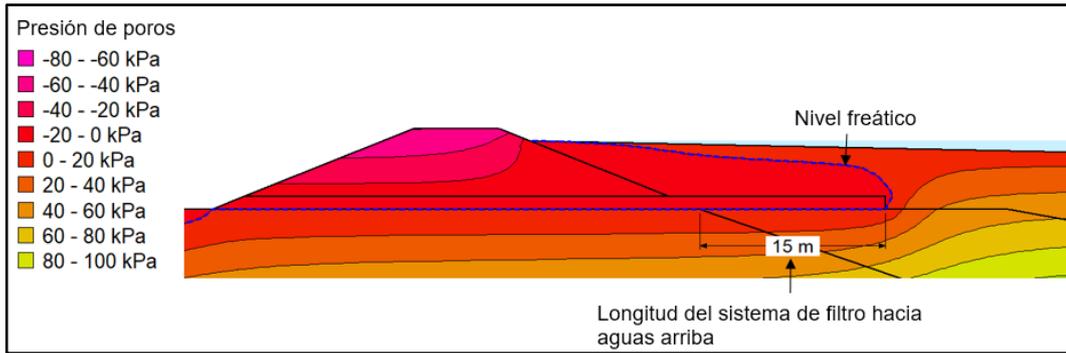
(B)



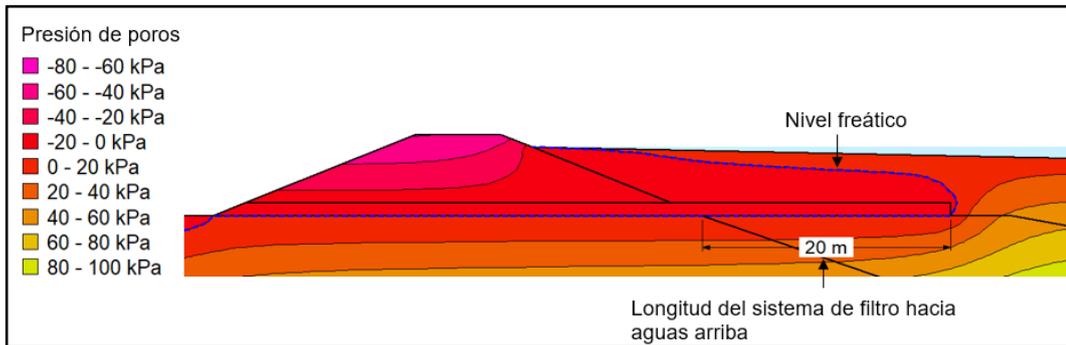
(C)



(D)



(E)



(F)

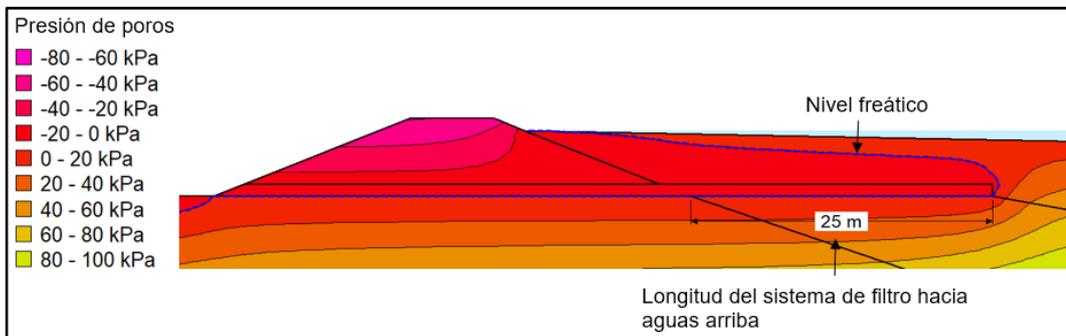
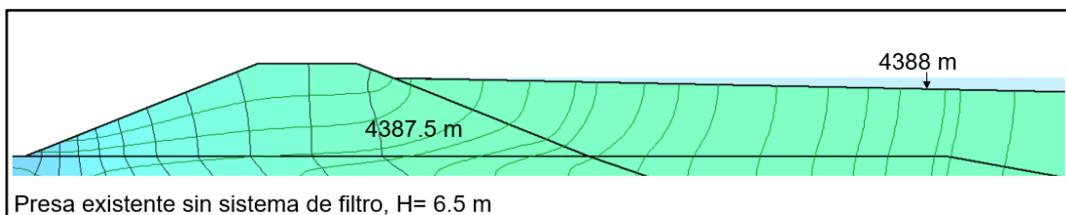
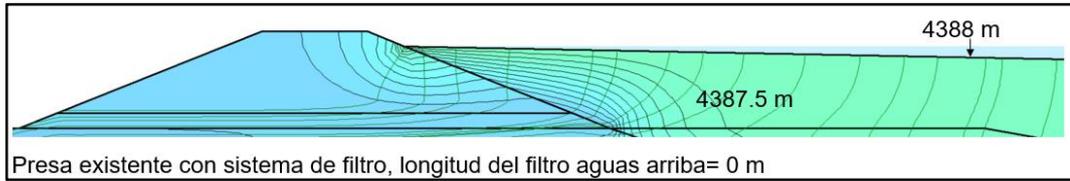


Figura N° 20 Análisis de infiltración de la presa existente con el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba

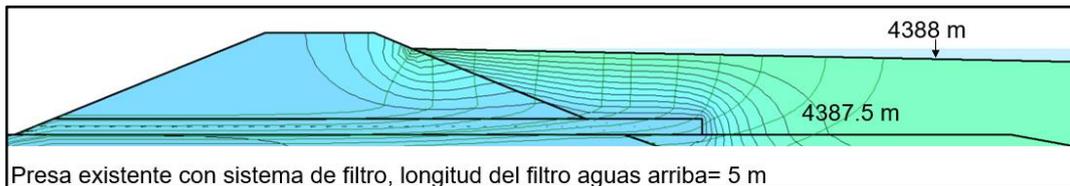
(A)



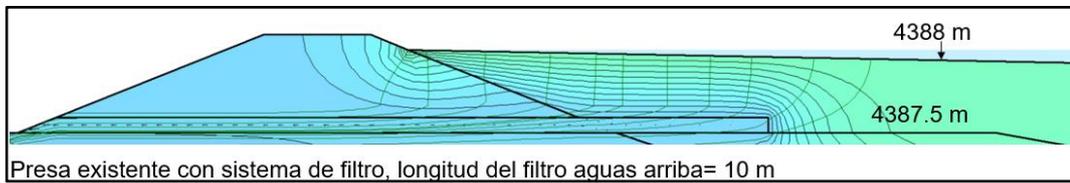
(B)



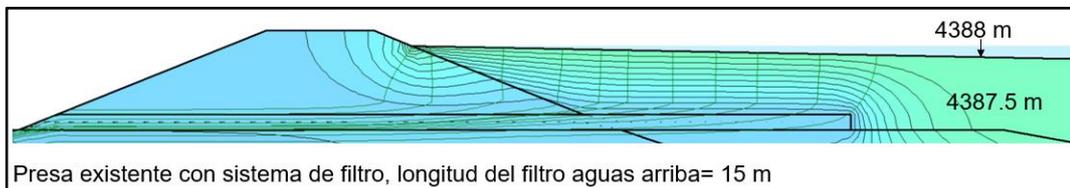
(C)



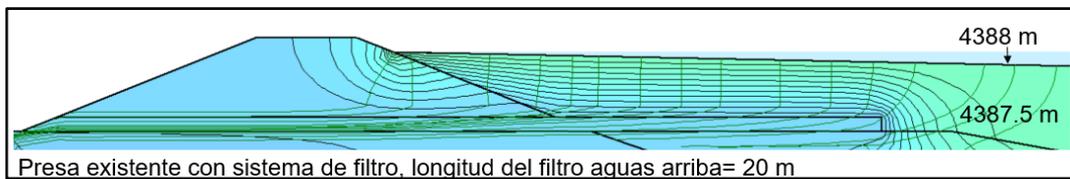
(D)



(E)



(F)



(G)

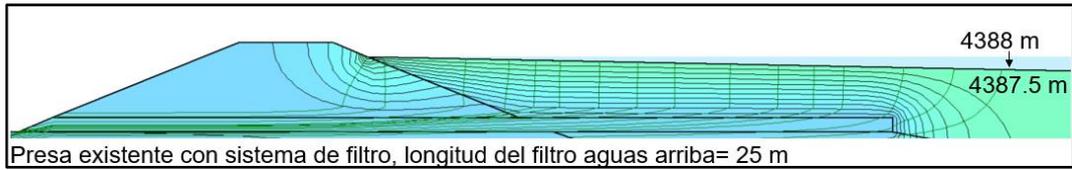
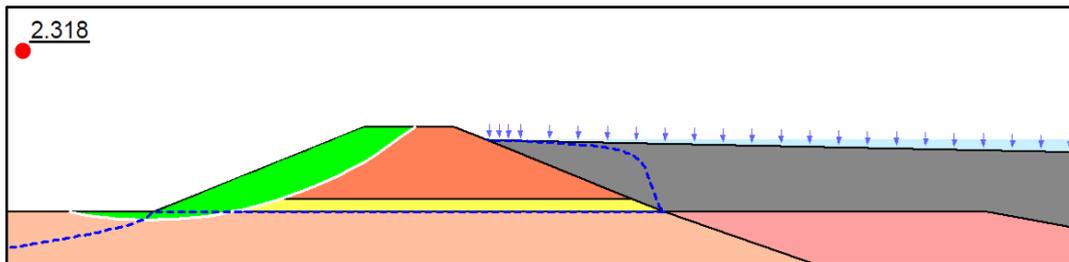


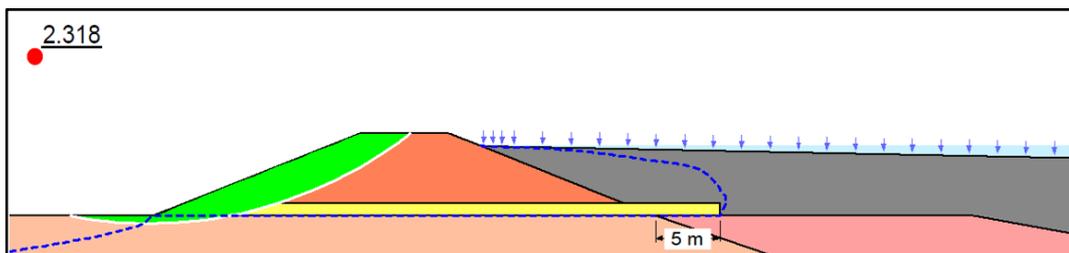
Figura N° 21 Redes de flujo de la presa existente sin sistema de filtro y con sistema de filtro.

Del análisis de estabilidad realizado se observa que el factor de seguridad es igual a 2.318 para los casos cuando la longitud del filtro hacia aguas arriba es de 5 m, 10 m, 15 m, 20 m y 25 m (ver figura N° 22). Del resultado obtenido se observa una mejora considerable con respecto al factor de seguridad sin dren horizontal alguno; sin embargo, la extensión del sistema de filtro hacia aguas arriba ya no incrementa el factor de seguridad.

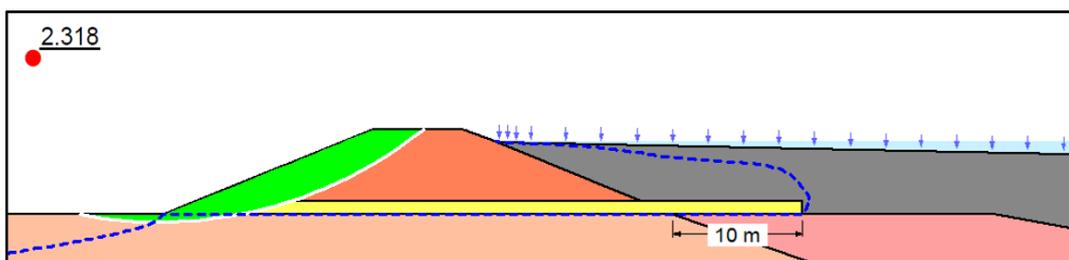
(A)



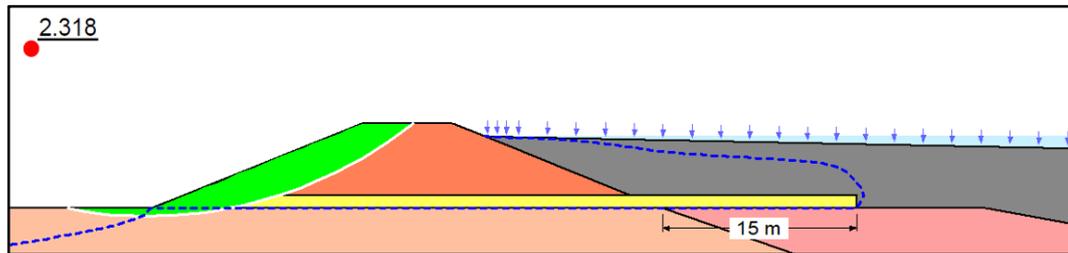
(B)



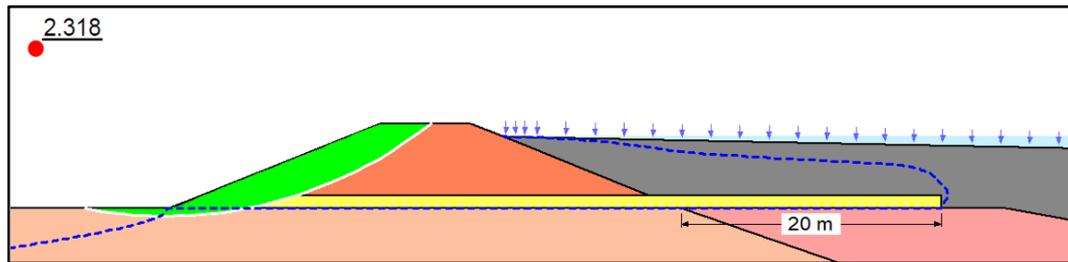
(C)



(D)



(E)



(F)

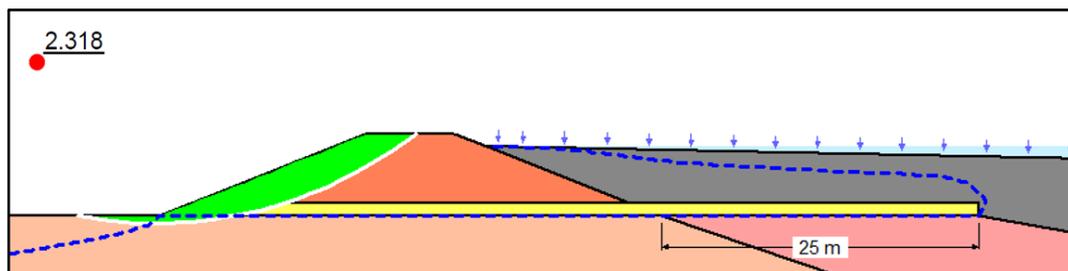


Figura N° 22 Análisis de estabilidad de la presa existente con el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba

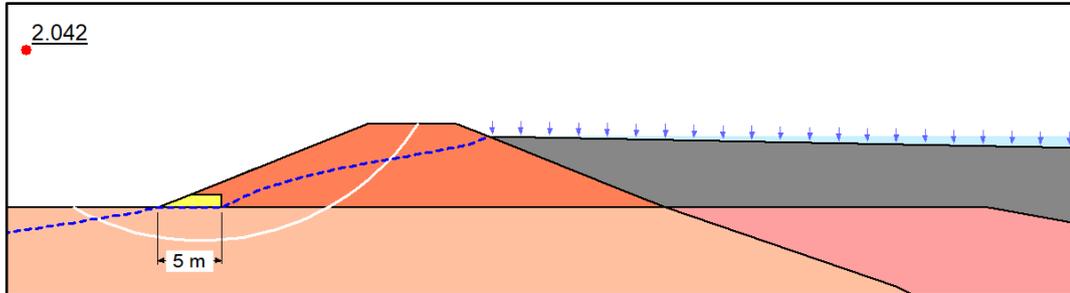
4.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA PRESA EXISTENTE CONSIDERANDO UN DREN HORIZONTAL

En la presente tesis se realizó un análisis adicional que consiste en evaluar la influencia de un dren horizontal de diversas longitudes en la presa existente, sobre el factor de seguridad al deslizamiento del talud aguas abajo.

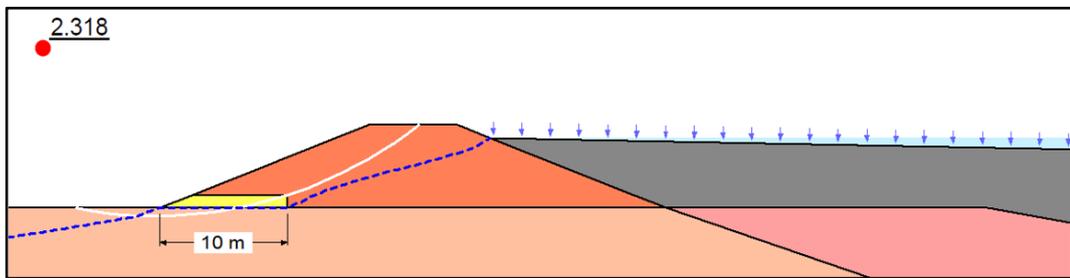
En la figura 23 A se considera una longitud del dren horizontal igual a 5 m, del análisis de estabilidad realizado se obtuvo que el factor de seguridad es de 2.042. Para las longitudes de 10 m, 15 m y 20 m el factor de seguridad alcanza un valor constante de 2.318. Este valor se mantiene constante debido a que la posición del

nivel freático se mantiene por debajo de la superficie de falla a partir de una longitud del dren horizontal de 10 m (figura 23 B, C y D).

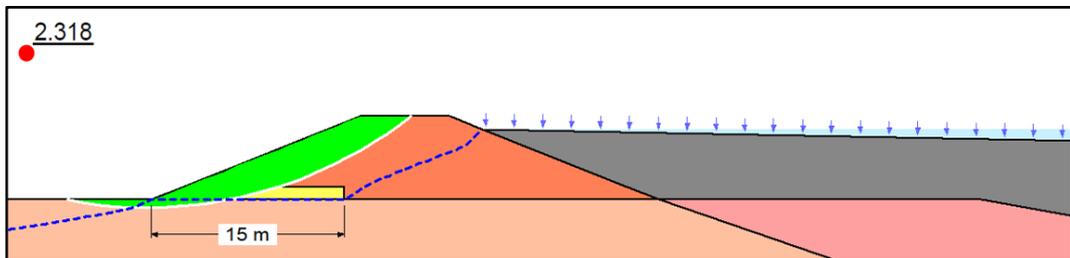
(A)



(B)



(C)



(D)

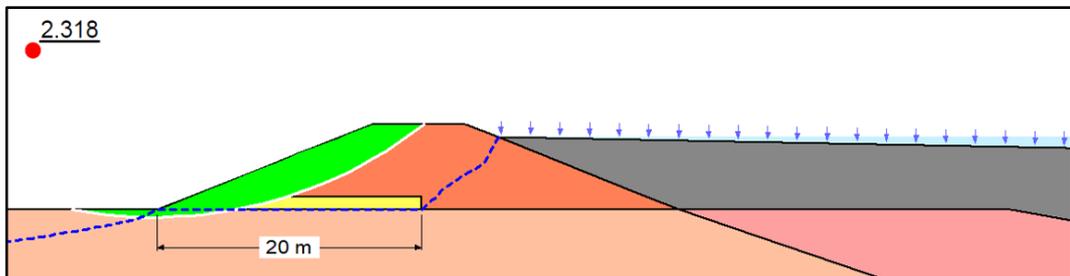


Figura N° 23 Análisis de estabilidad de la presa existente considerando un dren horizontal. Longitud de dren horizontal (A) 5 m, (B) 10 m, (C) 15 m y (D) 20 m.

4.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA PRESA SIN Y CON SISTEMA DE FILTRO PARA DIFERENTES ALTURAS DE LA PRESA

4.4.1 Para una altura de la presa $H= 7.5$ m

El factor de seguridad cuando la presa tiene una altura igual a 7.5 m y no cuenta con un dren es igual a 1.534, ver figura N° 24. Cuando la presa tiene un dren horizontal y se incrementa la longitud de este, el factor de seguridad va incrementándose desde 1.876 hasta llegar a un valor constante de 2.235 (figuras N° 25, 26 y 27).

El factor de seguridad cuando la presa tiene el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba es de 2.235, el valor se mantiene constante debido a que el nivel freático se aleja de la superficie de falla a partir de una longitud del dren horizontal de 15 m, según se puede observar en las figuras N° 28 y 29.

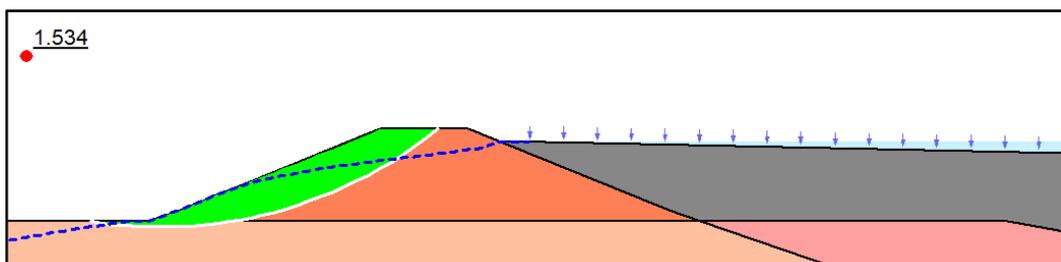


Figura N° 24 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa sin sistema de filtro para una altura $H= 7.5$ m.

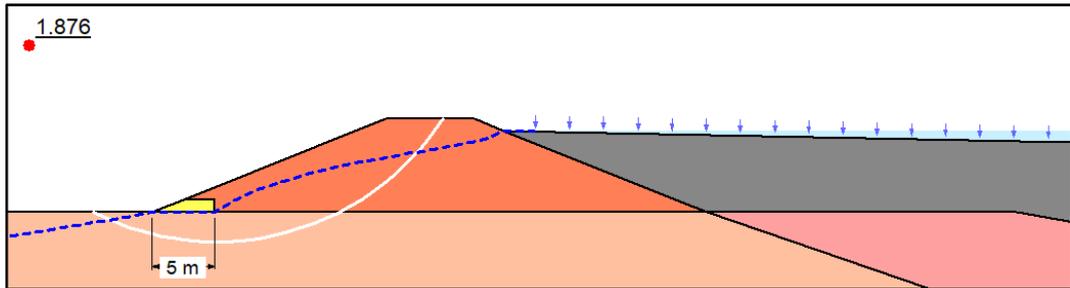


Figura N° 25 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L= 5\text{m}$, altura de la presa $H= 7.5\text{ m}$.

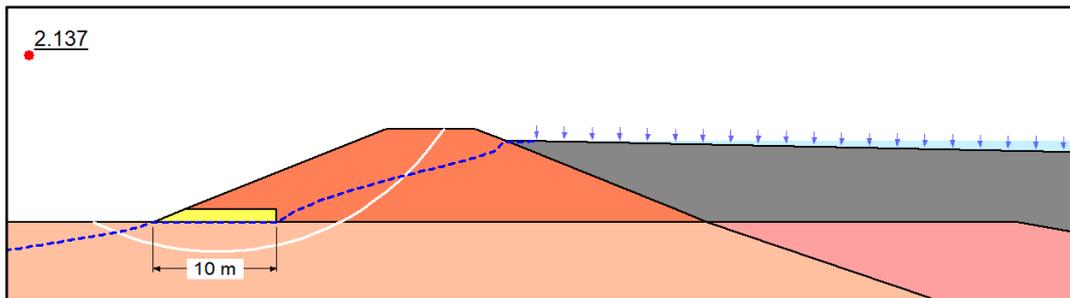


Figura N° 26 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L= 10\text{m}$, altura de la presa $H= 7.5\text{ m}$.

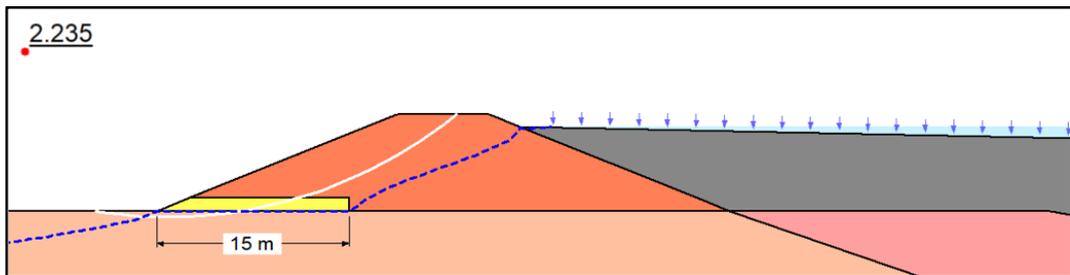


Figura N° 27 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L= 15\text{m}$, altura de la presa $H= 7.5\text{ m}$.

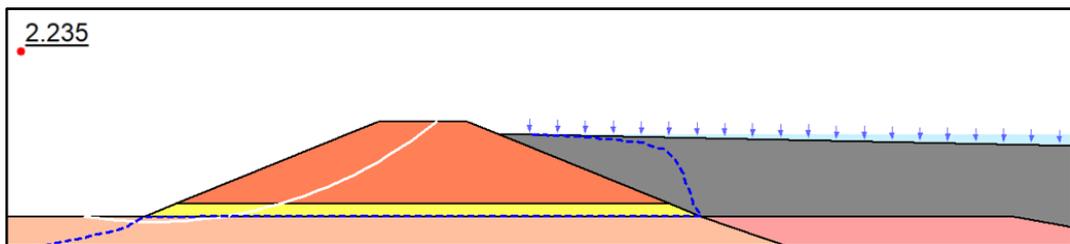


Figura N° 28 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L= 0\text{ m}$, altura de la presa $H= 7.5\text{ m}$.

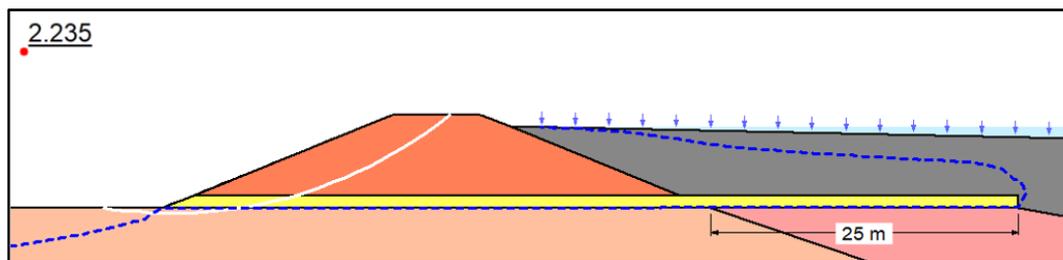


Figura N° 29 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L= 25$ m, altura de la presa $H= 7.5$ m.

4.4.2 Para una altura de la presa $H= 8.5$ m

El factor de seguridad cuando la presa tiene una altura igual a 8.5 m y no cuenta con un dren es igual a 1.465 (ver figura N° 30). Este valor del factor de seguridad no cumple con el mínimo aceptable de 1.5; por lo tanto, el uso del dren para esta altura de la presa ayudara a incrementar el valor del factor de seguridad. Tal como se muestra líneas abajo.

Cuando la presa tiene un dren horizontal y se incrementa la longitud de este, el factor de seguridad va incrementándose desde 1.763 hasta llegar a un valor constante de 2.114 (figuras N° 31, 32 y 33).

El factor de seguridad cuando la presa tiene el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba es de 2.114, este valor se mantiene constante debido a que el nivel freático se aleja de la superficie de falla a partir de una longitud del dren horizontal de 15 m, según se puede observar en las figuras N° 34 y 35.

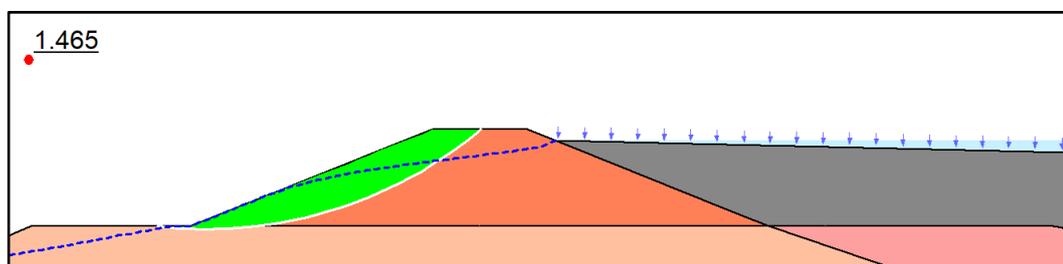


Figura N° 30 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa sin sistema de filtro para una altura $H = 8.5$ m.

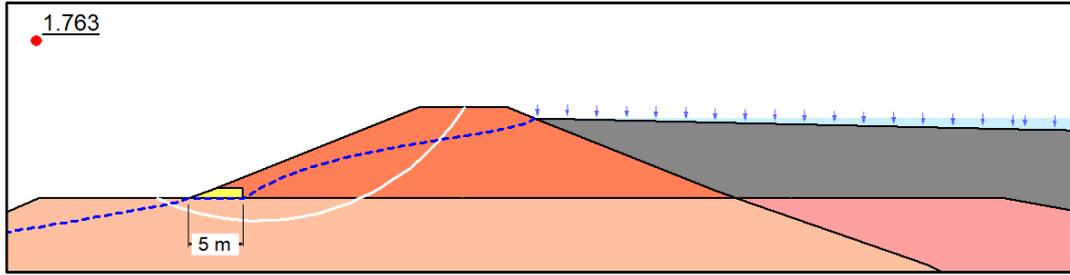


Figura N° 31 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L=5\text{ m}$, altura de la presa $H=8.5\text{ m}$.

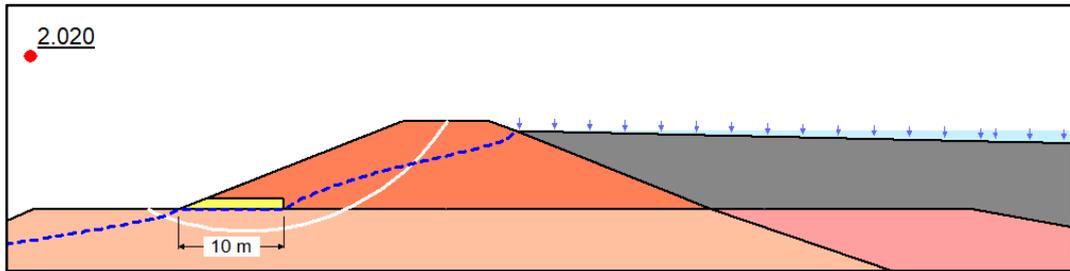


Figura N° 32 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L=10\text{ m}$, altura de la presa $H=8.5\text{ m}$.

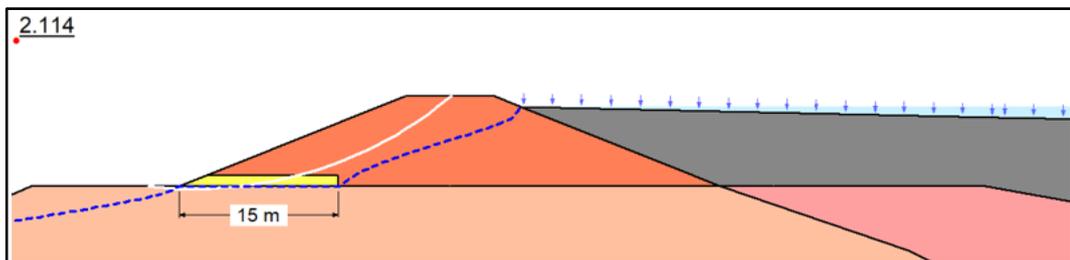


Figura N° 33 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L=15\text{ m}$, altura de la presa $H=8.5\text{ m}$.

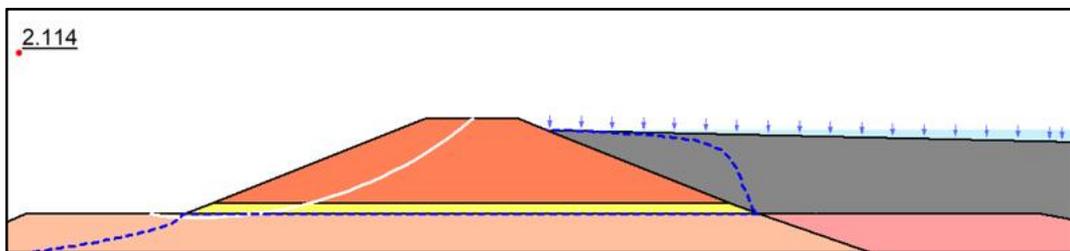


Figura N° 34 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L=0\text{ m}$, altura de la presa $H=8.5\text{ m}$.

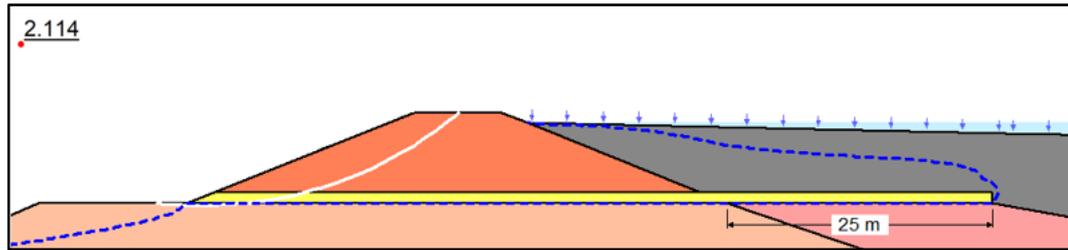


Figura N° 35 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 25$ m, altura de la presa $H = 8.5$ m.

4.4.3 Para una altura de la presa $H = 9.5$ m

El factor de seguridad cuando la presa tiene una altura igual a 9.5 m y no cuenta con un dren es igual a 1.507, ver figura N° 36.

Cuando la presa tiene un dren horizontal y se incrementa la longitud de este, el factor de seguridad va incrementándose desde 1.623 hasta llegar a un valor constante de 1.960 (figuras N° 37, 38, 39 y 40).

El factor de seguridad cuando la presa tiene el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba es de 1.960, el valor se mantiene constante debido a que el nivel freático se aleja de la superficie de falla a partir de una longitud del dren horizontal mayor de 20 m, según se puede observar en las figuras N° 41 y 42.

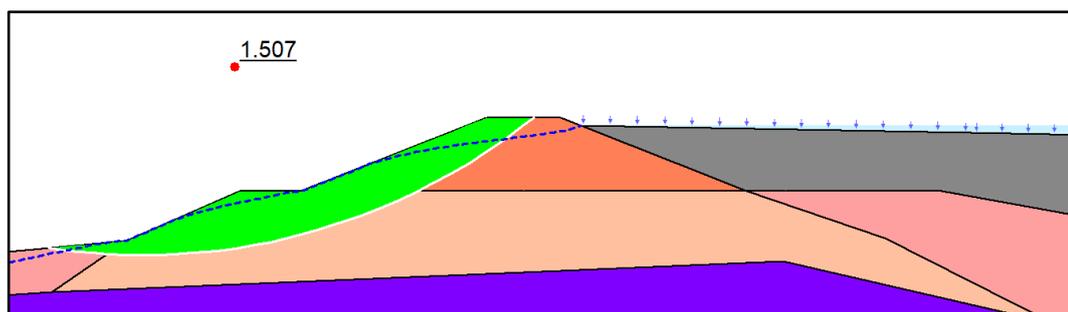


Figura N° 36 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa sin sistema de filtro para una altura $H = 9.5$ m.

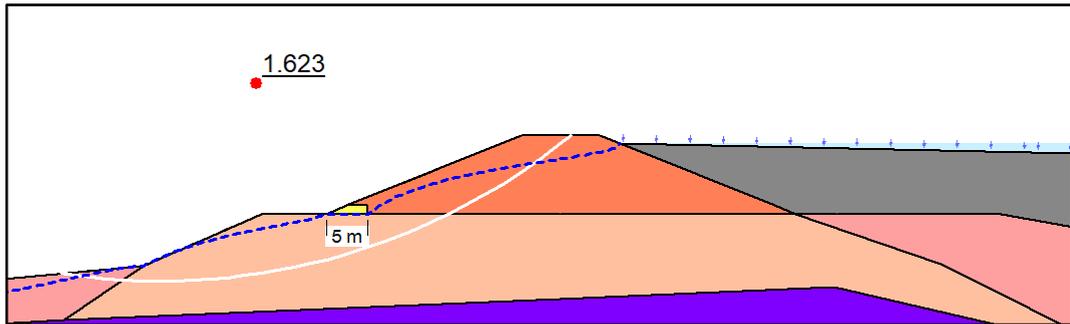


Figura N° 37 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 5\text{ m}$, altura de la presa $H = 9.5\text{ m}$.

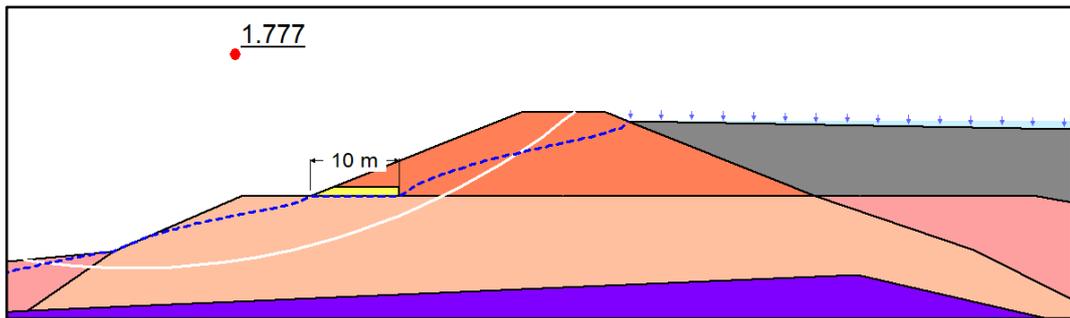


Figura N° 38 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 10\text{ m}$, altura de la presa $H = 9.5\text{ m}$.

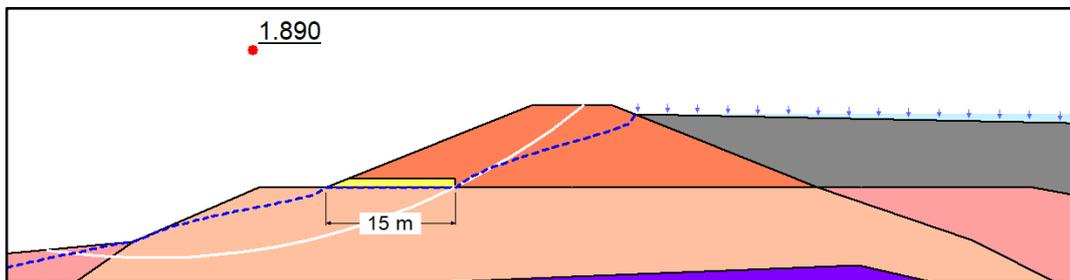


Figura N° 39 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 15\text{ m}$, altura de la presa $H = 9.5\text{ m}$.

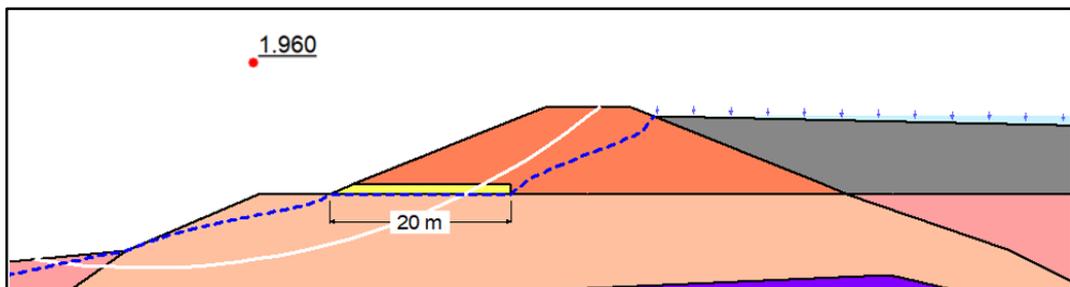


Figura N° 40 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 20\text{ m}$, altura de la presa $H = 9.5\text{ m}$.

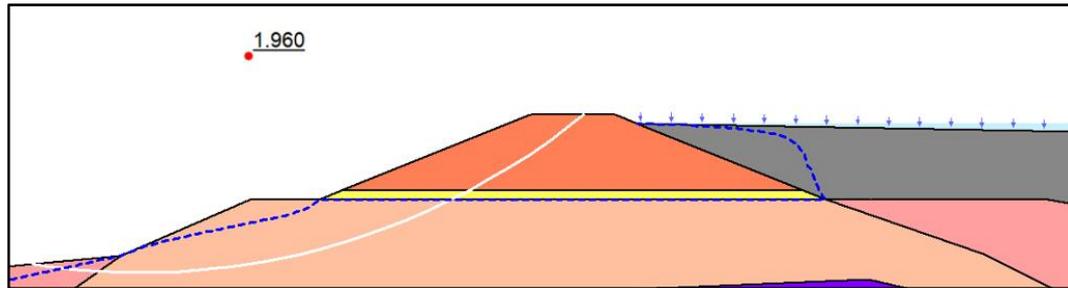


Figura N° 41 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 0$ m, altura de la presa $H = 9.5$ m.

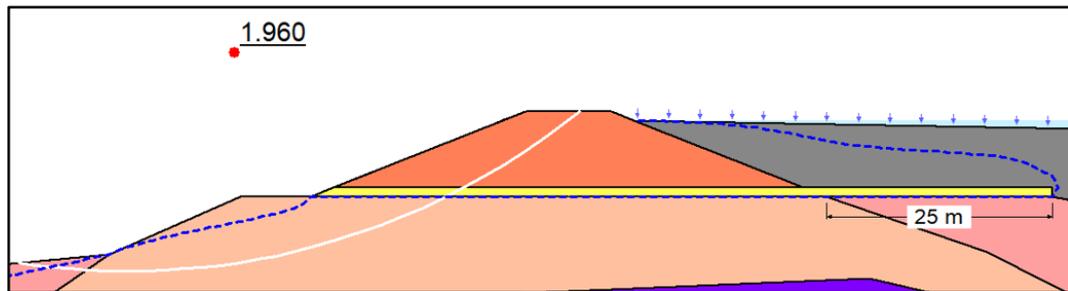


Figura N° 42 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 25$ m, altura de la presa $H = 9.5$ m

4.4.4 Para una altura de la presa $H = 10.5$ m

El factor de seguridad cuando la presa tiene una altura igual a 10.5 m y no cuenta con un dren es igual a 1.220 (ver figura N° 43). Este valor no cumple con el valor mínimo de 1.5; por lo tanto, se hace necesario el uso de un dren para incrementar el factor de seguridad.

Cuando la presa tiene un dren horizontal y se incrementa la longitud de este, el factor de seguridad va incrementándose desde 1.321 hasta llegar a un valor constante de 1.662 (figuras N° 44, 45, 46 y 47).

El factor de seguridad cuando la presa tiene el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba es de 1.662, el valor se mantiene constante debido a que el nivel freático se aleja de la superficie de falla a partir de una longitud del dren horizontal mayor de 20 m, según se puede observar en las figuras N° 48 y 49.

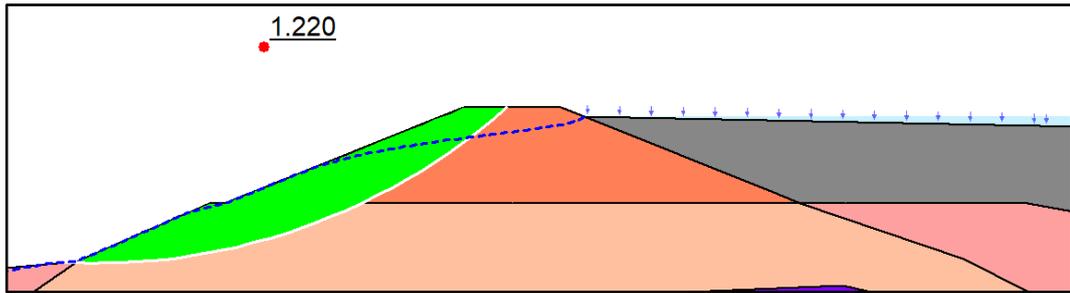


Figura N° 43 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa sin sistema de filtro para una altura $H = 10.5$ m.

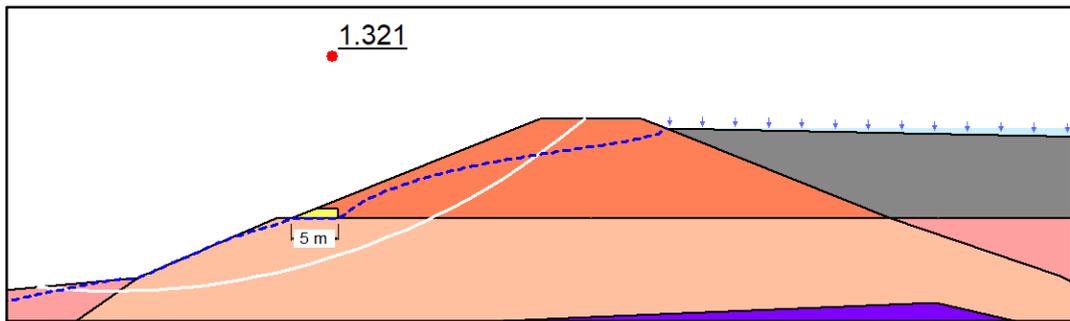


Figura N° 44 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 5$ m, altura de la presa $H = 10.5$ m.

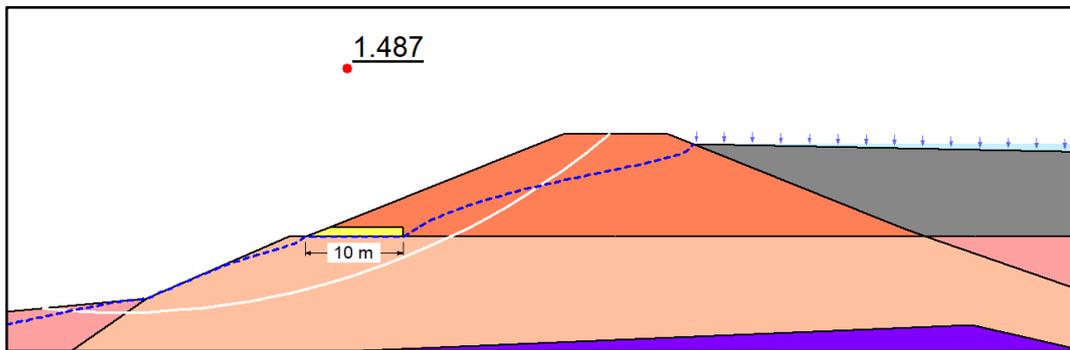


Figura N° 45 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 10$ m, altura de la presa $H = 10.5$ m.

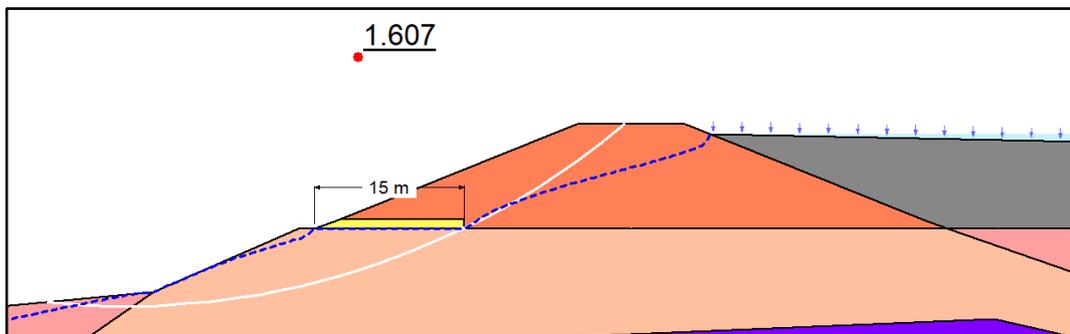


Figura N° 46 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 15$ m, altura de la presa $H = 10.5$ m.

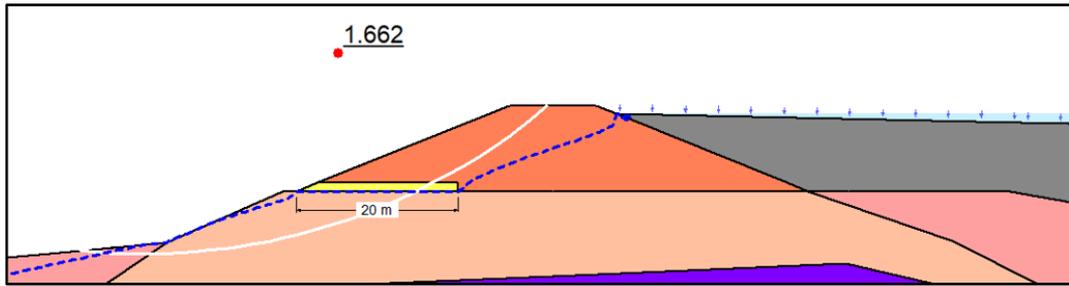


Figura N° 47 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa con un dren horizontal $L = 20\text{ m}$, altura de la presa $H = 10.5\text{ m}$.

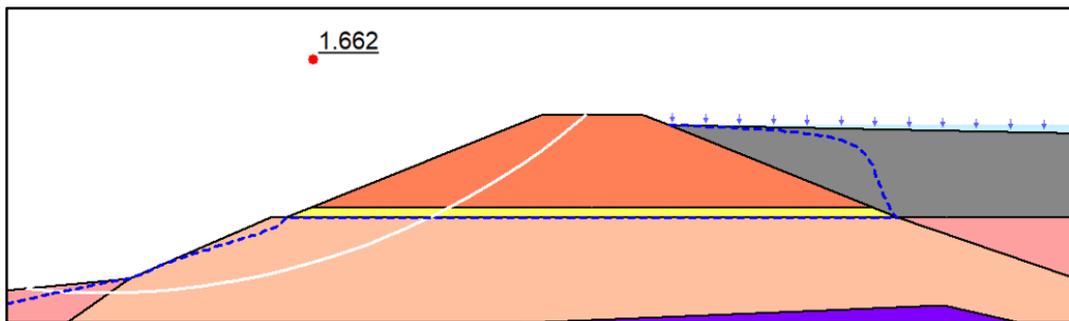


Figura N° 48 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 0\text{ m}$, altura de la presa $H = 10.5\text{ m}$.

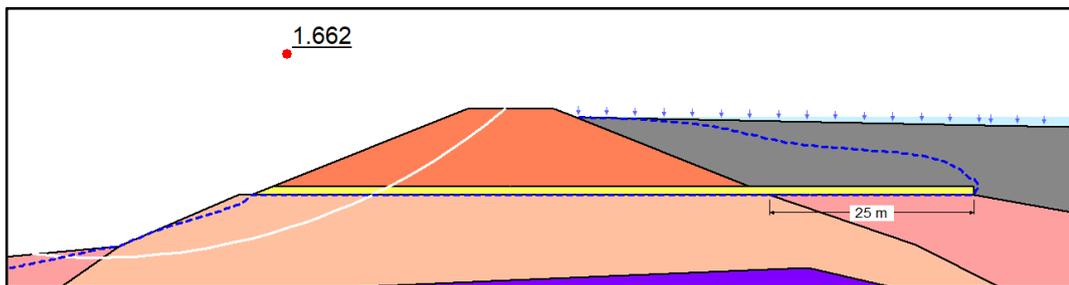


Figura N° 49 Factor de seguridad del talud aguas abajo de la presa un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba $L = 25\text{ m}$, altura de la presa $H = 10.5\text{ m}$.

4.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA PRESA CON SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO

Para el análisis de sensibilidad de la presa con el sistema de filtro extendido hacia aguas arriba se realizaron un total de 30 simulaciones considerando el sistema de filtro como parte del cuerpo de la presa. Las variables en análisis son la altura de la presa y la longitud del sistema de filtro. La altura de la presa varía desde 6.5 m hasta 10.5 m incrementándose en 1 m. La longitud del sistema de filtro hacia aguas arriba varía de 0 m a 25 m incrementándose en 5 m.

En la tabla N° 9 se muestran los valores del factor de seguridad de la cada simulación realizada.

Tabla N° 9 Factores de seguridad en condiciones estáticas.

Altura de la presa (m)	Longitud del filtro (m)	Factor de seguridad Modelo con el sistema de filtro	Número de simulación
H = 6.5 m	L ₀ = 0 m	2.318	Simulación N° 1 (S ₁)
	L ₁ = 5 m	2.318	Simulación N° 2 (S ₂)
	L ₂ = 10 m	2.318	Simulación N° 3 (S ₃)
	L ₃ = 15 m	2.318	Simulación N° 4 (S ₄)
	L ₄ = 20 m	2.318	Simulación N° 5 (S ₅)
	L ₅ = 25 m	2.318	Simulación N° 6 (S ₆)
H = 7.5 m	L ₀ = 0 m	2.235	Simulación N° 7 (S ₇)
	L ₁ = 5 m	2.235	Simulación N° 8 (S ₈)
	L ₂ = 10 m	2.235	Simulación N° 9 (S ₉)
	L ₃ = 15 m	2.235	Simulación N° 10 (S ₁₀)
	L ₄ = 20 m	2.235	Simulación N° 11 (S ₁₁)
	L ₅ = 25 m	2.235	Simulación N° 12 (S ₁₂)
H = 8.5 m	L ₀ = 0 m	2.114	Simulación N° 13 (S ₁₃)
	L ₁ = 5 m	2.114	Simulación N° 14 (S ₁₄)
	L ₂ = 10 m	2.114	Simulación N° 15 (S ₁₅)
	L ₃ = 15 m	2.114	Simulación N° 16 (S ₁₆)
	L ₄ = 20 m	2.114	Simulación N° 17 (S ₁₇)
	L ₅ = 25 m	2.114	Simulación N° 18 (S ₁₈)
H = 9.5 m	L ₀ = 0 m	1.960	Simulación N° 19 (S ₁₉)
	L ₁ = 5 m	1.960	Simulación N° 20 (S ₂₀)
	L ₂ = 10 m	1.960	Simulación N° 21 (S ₂₁)
	L ₃ = 15 m	1.960	Simulación N° 22 (S ₂₂)
	L ₄ = 20 m	1.960	Simulación N° 23 (S ₂₃)
	L ₅ = 25 m	1.960	Simulación N° 24 (S ₂₄)
H = 10.5 m	L ₀ = 0 m	1.662	Simulación N° 25 (S ₂₅)
	L ₁ = 5 m	1.662	Simulación N° 26 (S ₂₆)
	L ₂ = 10 m	1.662	Simulación N° 27 (S ₂₇)
	L ₃ = 15 m	1.662	Simulación N° 28 (S ₂₈)
	L ₄ = 20 m	1.662	Simulación N° 29 (S ₂₉)
	L ₅ = 25 m	1.662	Simulación N° 30 (S ₃₀)

Fuente: Elaboración propia

En el anexo 1 y anexo 2 se muestran los análisis de infiltración y estabilidad de las 30 simulaciones. En el anexo 3 se muestran las redes de flujo de las simulaciones realizadas.

CAPÍTULO V: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1 EFECTO DEL USO DE UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO HACIA AGUAS ARRIBA EN EL FACTOR DE SEGURIDAD DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES

En la tabla N° 10 se muestran los valores del factor de seguridad de la presa en estudio sin sistema filtro y con sistema de filtro para diferentes alturas. La longitud del filtro considerada es de 25 m hacia aguas arriba. De los resultados obtenidos se observa que la implementación del sistema de filtro puede incrementar el factor de seguridad hasta un 45.7%, esto debido a que la ubicación del nivel freático decrece o se aleja respecto de la superficie de falla. Cuando el nivel freático decrece, se incrementa el esfuerzo efectivo en las fuerzas resistentes al deslizamiento de la superficie de falla.

Tabla N° 10 Valores del factor de seguridad de la presa en estudio sin y con sistema de filtro para diferentes alturas.

Altura de la presa (m)	Modelo sin dren	Modelo con sistema de filtro ⁽¹⁾	% Incremento del FS ⁽²⁾
	Factor de seguridad	Factor de seguridad	
H ₀ = 6.5 m	1.613	2.318	43.7%
H ₁ = 7.5 m	1.534	2.235	45.7%
H ₂ = 8.5 m	1.465	2.114	44.3%
H ₃ = 9.5 m	1.507	1.960	30.1%
H ₄ = 10.5 m	1.220	1.662	36.2%

Notas:

(1) La longitud del sistema de filtro aguas arriba es de 25 m

(2) Indica el porcentaje de incremento del factor de seguridad después de incluir el sistema de filtro en la sección de la presa.

De los resultados mostrados en la tabla N° 10, cuando la presa no cuenta con un dren y tiene alturas de 8.5 m y 10.5 m, los valores del factor de seguridad obtenidos son igual a 1.465 y 1.220 respectivamente. Estos valores no cumplen con el valor mínimo de 1.5; por lo cual, es necesario deprimir el nivel freático.

5.2 INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

5.2.1 Influencia de la longitud del filtro en el factor de seguridad

En la figura N° 50, se muestran los valores de la longitud del sistema de filtro aguas arriba versus el factor de seguridad para cada altura de la presa evaluada. Se evidenció que el incremento de la longitud del filtro aguas arriba no afecta el factor de seguridad. Por lo tanto, el factor de seguridad es independiente de la longitud que tenga el sistema de filtro aguas arriba.

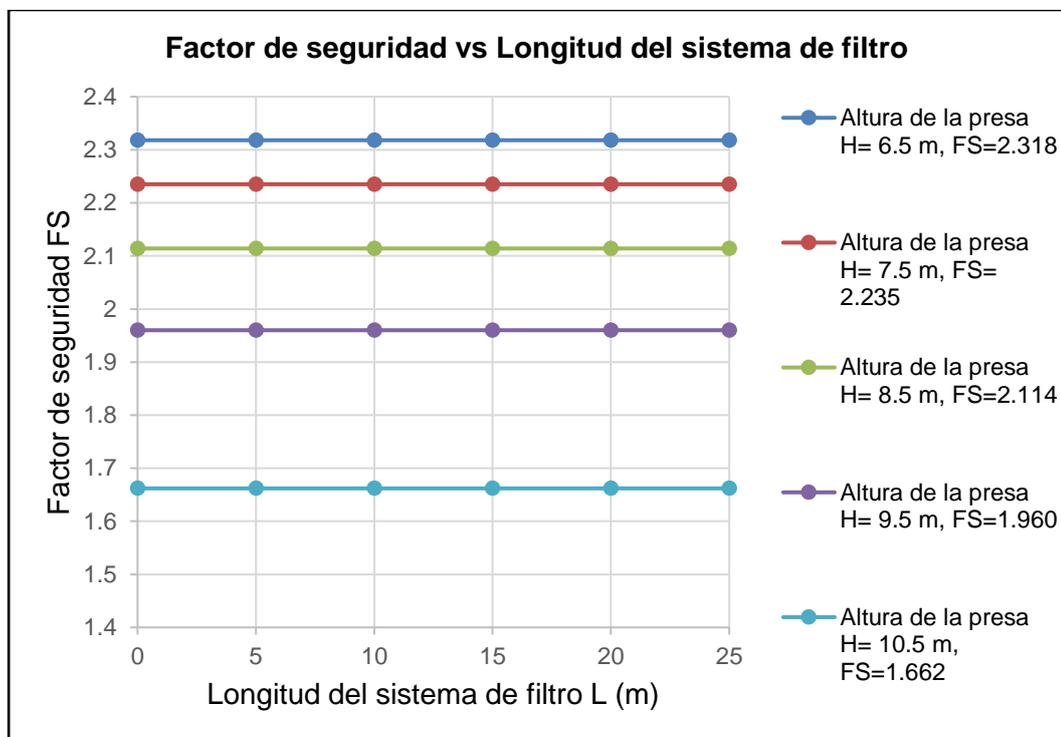


Figura N° 50 Valores del factor de seguridad versus longitud del sistema de filtro.

Fuente: Elaboración propia.

De igual modo, para cada simulación se evaluaron los caudales a la salida del sistema de filtro, los resultados obtenidos para todas las iteraciones se muestran en la tabla N° 11 y en la figura N° 50.

Tabla N° 11 Caudal en la salida del filtro

Altura de la presa (m)	Longitud del dren (m)	Caudal en el filtro (l/s)
H ₀ = 6.5 m	L ₀ = 0 m	0.0700
	L ₁ = 5 m	0.0868
	L ₂ = 10 m	0.1073
	L ₃ = 15 m	0.1366
	L ₄ = 20 m	0.1812
	L ₅ = 25 m	0.2615
H ₁ = 7.5 m	L ₀ = 0 m	0.1172
	L ₁ = 5 m	0.1430
	L ₂ = 10 m	0.1749
	L ₃ = 15 m	0.2208
	L ₄ = 20 m	0.2934
	L ₅ = 25 m	0.4313
H ₂ = 8.5 m	L ₀ = 0 m	0.2028
	L ₁ = 5 m	0.2527
	L ₂ = 10 m	0.3192
	L ₃ = 15 m	0.4266
	L ₄ = 20 m	0.6296
	L ₅ = 25 m	1.0934
H ₃ = 9.5 m	L ₀ = 0 m	0.2298
	L ₁ = 5 m	0.2788
	L ₂ = 10 m	0.3411
	L ₃ = 15 m	0.4350
	L ₄ = 20 m	0.5947
	L ₅ = 25 m	0.9260
H ₄ = 10.5 m	L ₀ = 0 m	0.3112
	L ₁ = 5 m	0.3805
	L ₂ = 10 m	0.4706
	L ₃ = 15 m	0.6100
	L ₄ = 20 m	0.8513
	L ₅ = 25 m	1.3204

Fuente: Elaboración propia

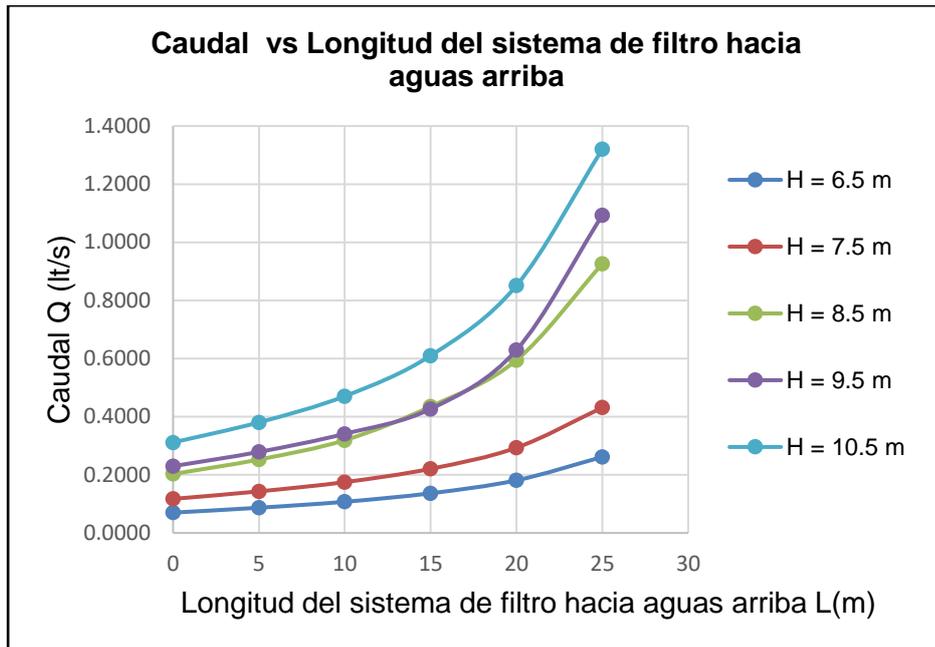


Figura N° 51 Valores del caudal en el filtro versus longitud del filtro.

Fuente: Elaboración propia

Según lo mostrado en la figura N° 51 se interpreta lo siguiente:

- Para una altura constante, el caudal en el dren aumenta conforme se incrementa la longitud del filtro aguas arriba. Esto debido a que se aumenta el área a ser drenada.

5.2.2 Influencia de la altura de la presa en el factor de seguridad

Del análisis de sensibilidad realizado para evaluar cómo afecta la altura de la presa en el factor de seguridad, cuyos valores se muestran en la tabla N° 9, se evidencia que el factor de seguridad disminuye a medida que aumenta la altura de la presa, tal como se puede ver en la figura N° 52. En la figura N° 52 se grafican los valores del factor de seguridad obtenidos para diferentes alturas de la presa que cuentan con un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba.

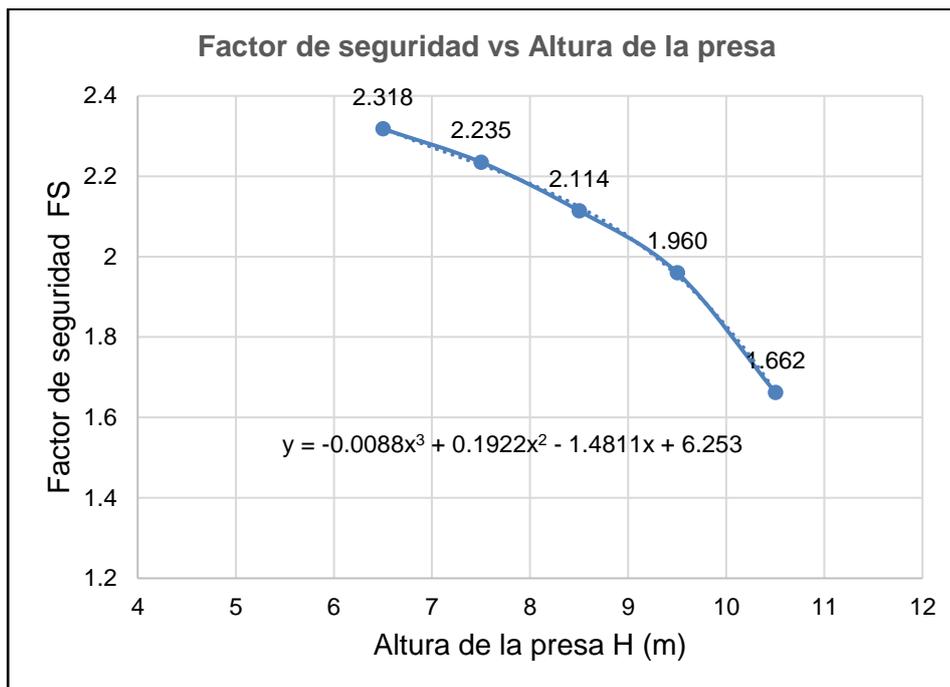


Figura N° 52 Valores del factor de seguridad versus la altura de la presa.

Fuente: Elaboración propia

En la presa de relaves para las condiciones de los materiales descritas en la tabla N° 6 y condiciones geométricas semejantes, se puede aproximar la relación entre la altura de la presa y el factor de seguridad mediante la ecuación N° 27 (para esta aproximación se consideran los puntos mostrados en la figura N° 52).

$$FS = -0.0088H^3 + 0.1922H^2 - 1.4811H + 6.253 \quad (27)$$

Donde:

FS= factor de seguridad

H= altura de la presa

En la tabla N° 13 se muestra el cálculo del factor de seguridad usando la ecuación N° 27, de lo analizado se observa que la ecuación para el cálculo del factor de seguridad tiene una variación máxima de ± 0.04 .

Tabla N° 12 Cálculo matemático del factor de seguridad

Altura de la presa (m) (A)	Factor de seguridad Modelo con dren (B)	Cálculo del Factor de seguridad ⁽¹⁾ (C)	Diferencia (C) - (B)
6.5	2.318	2.330	0.01
7.5	2.235	2.244	0.01
8.5	2.114	2.146	0.03
9.5	1.960	1.984	0.02
10.5	1.662	1.704	0.04

Nota:

(1) Cálculo del factor de seguridad usando la ecuación N° 27.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El análisis realizado consistió inicialmente en comparar el valor del factor de seguridad obtenido cuando la presa existente no tiene el sistema de filtro y cuando posee el sistema de filtro. Luego se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar cómo influye la longitud del filtro aguas arriba y la altura de la presa en el factor de seguridad, para realizar este análisis se realizaron 30 simulaciones. Al finalizar la investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se ha evaluado la influencia de un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba en el factor de seguridad de una presa de almacenamiento de relaves existente. Esta evaluación se ha realizado mediante la comparación de los resultados del análisis de estabilidad física del talud aguas abajo usando el método de equilibrio limite. Los resultados indican que la inclusión del sistema de filtro mejora la estabilidad de la presa existente en un 43.7%, además decrece la ubicación del nivel freático y reduce la presión de poros en la zona de la playa de relaves que se encuentra sobre el filtro.
- Al realizarse el análisis de estabilidad de la presa se determinó que la superficie crítica está casi completamente por debajo del nivel freático, lo cual es una condición no deseable en el diseño de las presas de tierra. Por ello se justifica proyectar un dren horizontal que deprima el nivel freático.
- Para las diferentes alturas analizadas de la presa, se encontró que el factor de seguridad puede aumentar hasta en un 45.7% para una altura de la presa igual a 7.5 m, el que se debe al uso del sistema de filtro.
- Del análisis de sensibilidad realizado se puede concluir que el factor de seguridad es independiente de la longitud que tenga el filtro aguas arriba; es decir, es suficiente que el sistema de filtro se extienda lo suficiente hasta cubrir la base de la presa.

De analizarse menores longitudes del filtro se puede concluir que longitud del filtro es realmente necesaria para que el nivel freático y el factor de seguridad cumplan con las condiciones requeridas; por este motivo se analizó un dren horizontal (cuyas características son similares al sistema de filtro y la diferencia es que no tiene una extensión hacia aguas arriba).

Del análisis realizado se concluye que la longitud del filtro necesaria para una altura de 6.5 m es de 10 m y para una altura de 10.5 m es de 20 m.

- El factor de seguridad depende de la altura de la presa, a medida que se aumenta la altura disminuye el factor de seguridad. Esto se concluye del análisis de sensibilidad realizado.

- A medida que se aumenta la longitud del filtro aguas arriba en la presa existente se incrementa el caudal en el sistema de filtro, esto debido a que se extiende el área de captación.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere evaluar la posición del filtro en el cuerpo de la presa con el objetivo de adaptarlo a las condiciones del terreno y evaluar su influencia en el factor de seguridad.
- Si bien el factor de seguridad es independiente de la longitud del dren aguas arriba para la presa analizada, se sugiere evaluar la influencia de un dren horizontal. En caso de que el dren horizontal no sea suficiente para mejorar el factor de seguridad se recomienda evaluar el uso de un dren chimenea.
- Se recomienda analizar como variable la permeabilidad del material del cuerpo de la presa y la anisotropía en la permeabilidad del relave.
- Se sugiere evaluar la tubificación en la presa de relaves.

BIBLIOGRAFÍA

Autoridad Nacional del Agua. (2015). Inventario de presas en el Perú (primera parte). Ana website: <http://www.ana.gob.pe/>.

Azam, S., y Li. (2010). Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, 28(4), 50-54.

Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous materials*. Society of Petroleum Engineers. Dallas.

Bertram, G. E. (1940). An experimental investigation of protective filters. *Harvard soils mechanics series*. Núm. 7.

Broaddus, M. (2015). *Performing a steady- state seepage analysis using Seep/w: a primer for engineering students*. University of Louisville.

Bridle, R., y Fell, R. (2013). Internal erosion of existing dams, levees and dykes, and their foundations. *Bulletin 164, Volume 1: Internal Erosion Processes and Engineering Assessment*.

Calamk, M., Bingol, A. N., y Yanmaz, A. M. (2016). *Effect of Drainage Properties on Seepage Behavior of Earth-Fill Dams*. University of South Carolina.

Cardona, A., Kohan, P. H., Quinteros, R. D., y Storti, M. A. (2012). *Modelos Analíticos y Numéricos para la determinación de Infiltración en Presas de material suelto. Análisis de su uso y sensibilidad*. Asociación Argentina de Mecánica Computacional.

Cho, S. E. (2009). Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics. *Engineering Geology*, 105(1-2), 32-43.

Das M. Braja. (2008). Advanced Soil Mechanics. Third edition, Taylor y Francis Group.

Das, B. M., y Sobhan, K. (2013). Principles of geotechnical engineering. Cengage learning.

Departamento de Recursos, Energía y Turismo del Gobierno de Australia. (2016). Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry. <http://www.ret.gov.au>.

FEMA (Federal Emergency Management Agency). (2011). Filters for Embankment Dams: Best Practices for Design and Construction. Federal Emergency Management Agency.

Fernández, A., López, N. (2016). Fuerzas de filtración en depósitos de relaves mineros. <http://www.researchgate.net>.

Flores, R. y Gaytan, I. (2003). Granular filter analysis review. Soil and Rock America 2003. 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Goetechnical Engineering. 2003, pp. 1523-1528.

Foster, M., y Fell, R.. (2001). Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(5), 398-407.

Geo-Slope International Ltd. (2012). Seepage modeling with SEEP/W. <http://www.geo-slope.com>.

Golder Associates. (2016). Review of Tailings Management Guidelines and Recommendations for improvement. https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/tailings/161205_review-of-tailings-management-guidelines.pdf.

International Commission on Large Dams (ICOLD). (1994). Use of granular filters and drains in embankment dams, Bulletin 95.

Knight, Z. (2015). Slope stability analysis of tailings dam embankments. Charles Darwin University.

MacGregor, P., Fell, R., Stapledon, D., Bell, G., y Foster, M. (2014). Geotechnical engineering of dams. CRC press.

McLeod, H., y Murray, L. (2003). Tailings dam versus a water dam, what is the design difference. In ICOLD Symposium on Major Challenges in Tailings Dams (Vol. 15, p. 12).

Mosquera, J., Hamade, T., y Mitri, H. (2013). Comparative Stability Analysis of Tailings Storage Facilities. McGill University.

Pak, A., y Nabipour, M. (2017). Numerical Study of the Effects of Drainage Systems on Saturated/Unsaturated Seepage and Stability of Tailings Dams. Mine Water and the Environment, 36(3), 341-355.

Raymond, L. S. Jr. (1988). "What is groundwater", New York Water Resources Institute Bulletin N°1, Cornell University.

Saad, B. (2013). Mitigation Measures for Stability Enhancement of Tailing Dams during Construction. In Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III (pp. 657-669).

Sáez, Esteban. (2010). Fundamentos de Geotecnia. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Sherard, J. L., y Dunnigan, L. P. (1989). Critical filters for impervious soils. Journal of Geotechnical Engineering, 115(7), 927-947.

Tanchev, L.. (2014). Dams and appurtenant hydraulic structures. y Dunnigan. CRC Press.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). (2000). Appendix D- filter design. EM 1110-2-1913.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION (USBR). (2000). Protective filter. Design standards num. 13. Embankment dams. Chap. 5.

Villanueva Jiménez Aquiles. (2006). Diseño de Presa de Relaves Alpamarca y el uso de materiales de mina como cuerpo de la Presa. Universidad Nacional de Ingeniería.

Wan, C. F., Fell, R., y Foster, M. A.. (2002). Experimental investigation of the rate of erosion of soils in embankment dams. In ANCOLD Conference on Dams.

World Information Service on Energy (WISE). (2017). Chronology of major tailings dam failures. <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>.

ANEXOS

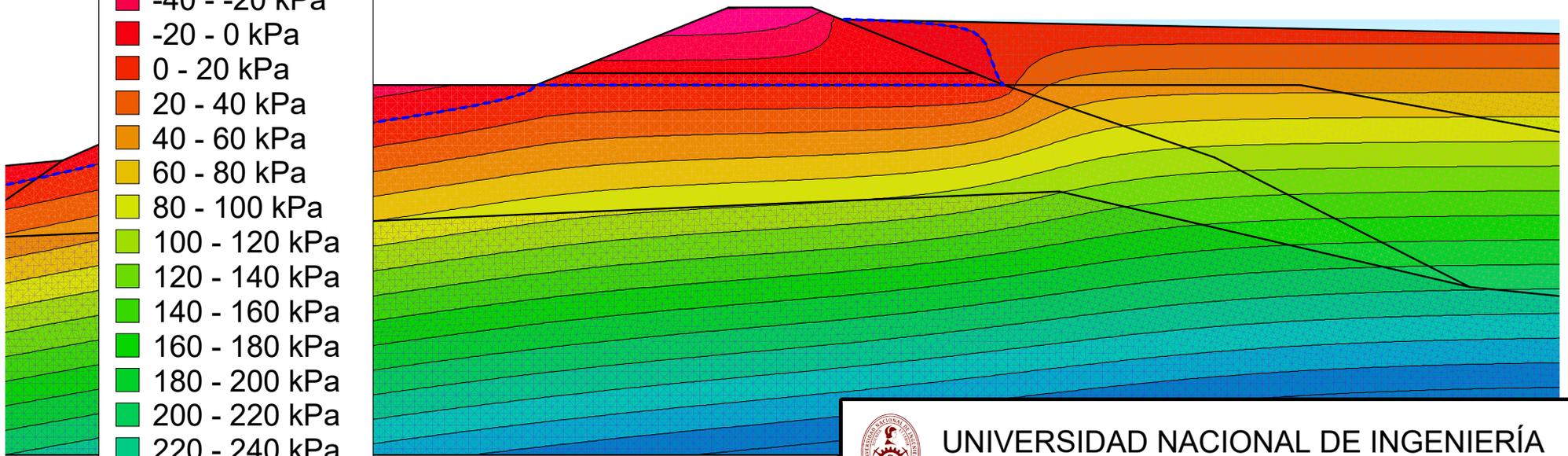
ANEXO 1

Resultados del análisis de infiltración de las 30 simulaciones

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -80 - -60 kPa
- -60 - -40 kPa
- -40 - -20 kPa
- -20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa
- 180 - 200 kPa
- 200 - 220 kPa
- 220 - 240 kPa
- 240 - 260 kPa
- 260 - 280 kPa
- ≥ 280 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

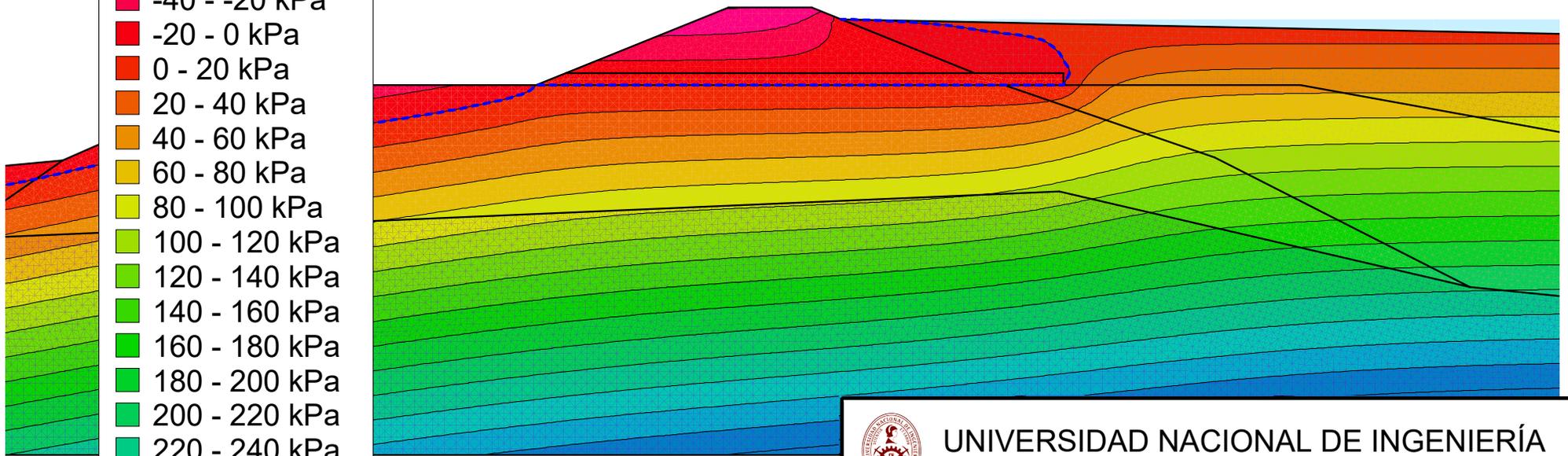
Altura de la presa: 6.5 m Simulación N°1

Longitud del dren horizontal: 0 m Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -80 - -60 kPa
- -60 - -40 kPa
- -40 - -20 kPa
- -20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa
- 180 - 200 kPa
- 200 - 220 kPa
- 220 - 240 kPa
- 240 - 260 kPa
- 260 - 280 kPa
- ≥ 280 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°2

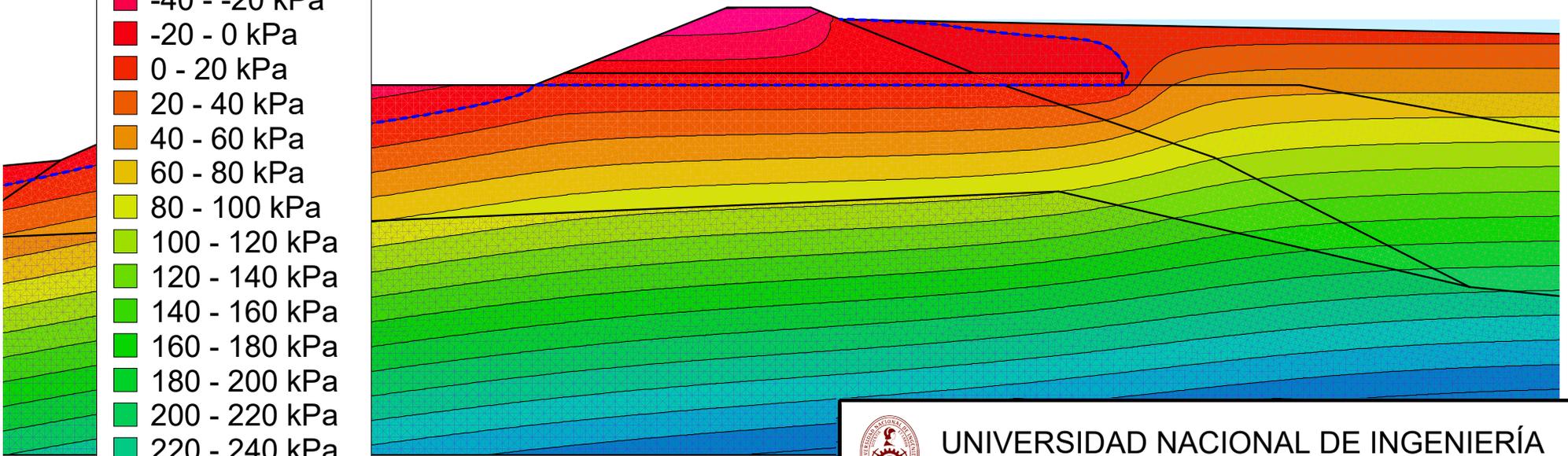
Longitud del dren horizontal: 5 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
 FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -80 - -60$ kPa
- $-60 - -40$ kPa
- $-40 - -20$ kPa
- $-20 - 0$ kPa
- $0 - 20$ kPa
- $20 - 40$ kPa
- $40 - 60$ kPa
- $60 - 80$ kPa
- $80 - 100$ kPa
- $100 - 120$ kPa
- $120 - 140$ kPa
- $140 - 160$ kPa
- $160 - 180$ kPa
- $180 - 200$ kPa
- $200 - 220$ kPa
- $220 - 240$ kPa
- $240 - 260$ kPa
- $260 - 280$ kPa
- ≥ 280 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

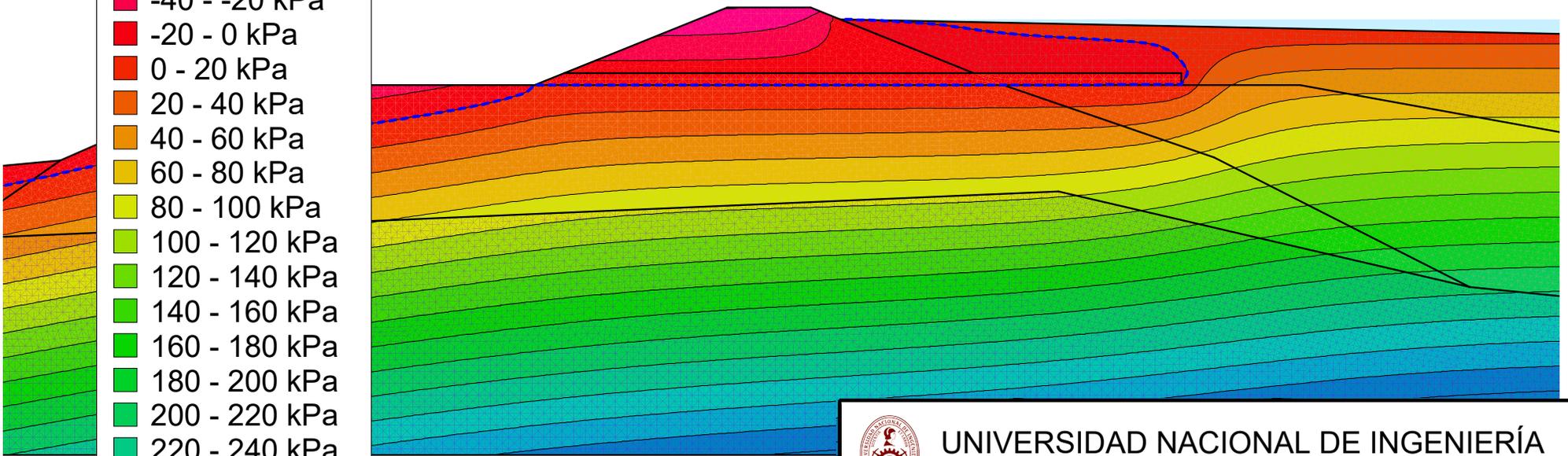
Altura de la presa: 6.5 m Simulación N°3

Longitud del dren horizontal: 10 m Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -80 - -60 kPa
- -60 - -40 kPa
- -40 - -20 kPa
- -20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa
- 180 - 200 kPa
- 200 - 220 kPa
- 220 - 240 kPa
- 240 - 260 kPa
- 260 - 280 kPa
- ≥ 280 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°4

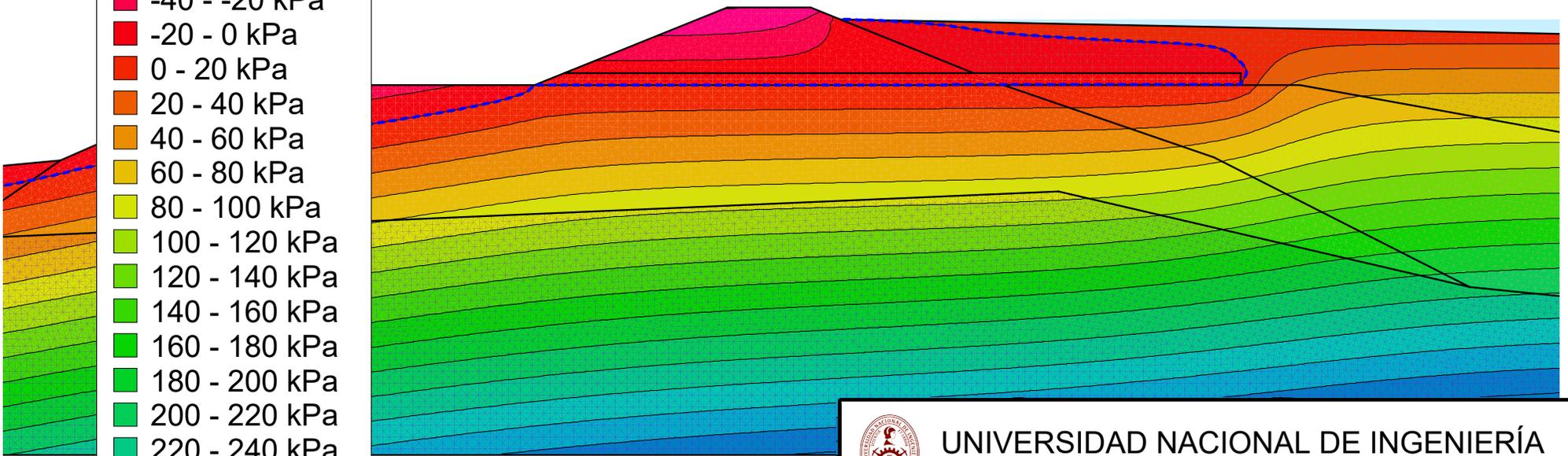
Longitud del dren horizontal: 15 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -80 - -60$ kPa
- $-60 - -40$ kPa
- $-40 - -20$ kPa
- $-20 - 0$ kPa
- $0 - 20$ kPa
- $20 - 40$ kPa
- $40 - 60$ kPa
- $60 - 80$ kPa
- $80 - 100$ kPa
- $100 - 120$ kPa
- $120 - 140$ kPa
- $140 - 160$ kPa
- $160 - 180$ kPa
- $180 - 200$ kPa
- $200 - 220$ kPa
- $220 - 240$ kPa
- $240 - 260$ kPa
- $260 - 280$ kPa
- ≥ 280 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°5

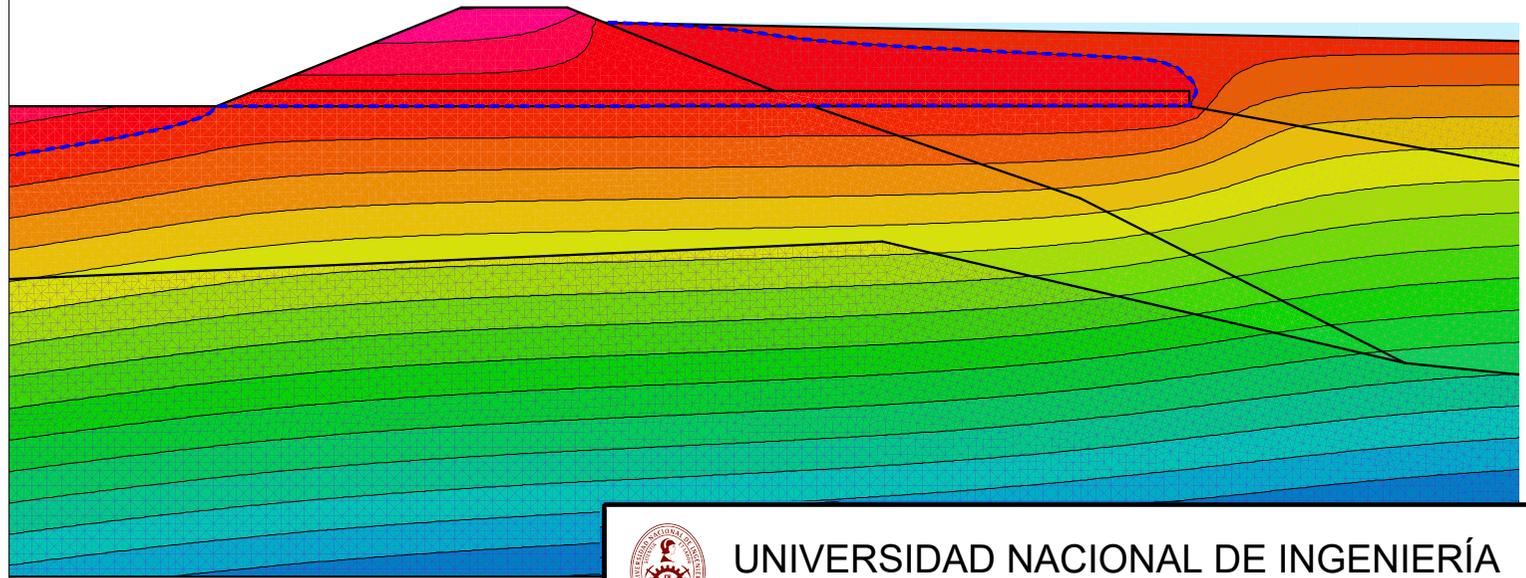
Longitud del dren horizontal: 20 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -80 - -60$ kPa
- $-60 - -40$ kPa
- $-40 - -20$ kPa
- $-20 - 0$ kPa
- $0 - 20$ kPa
- $20 - 40$ kPa
- $40 - 60$ kPa
- $60 - 80$ kPa
- $80 - 100$ kPa
- $100 - 120$ kPa
- $120 - 140$ kPa
- $140 - 160$ kPa
- $160 - 180$ kPa
- $180 - 200$ kPa
- $200 - 220$ kPa
- $220 - 240$ kPa
- $240 - 260$ kPa
- $260 - 280$ kPa
- ≥ 280 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°6

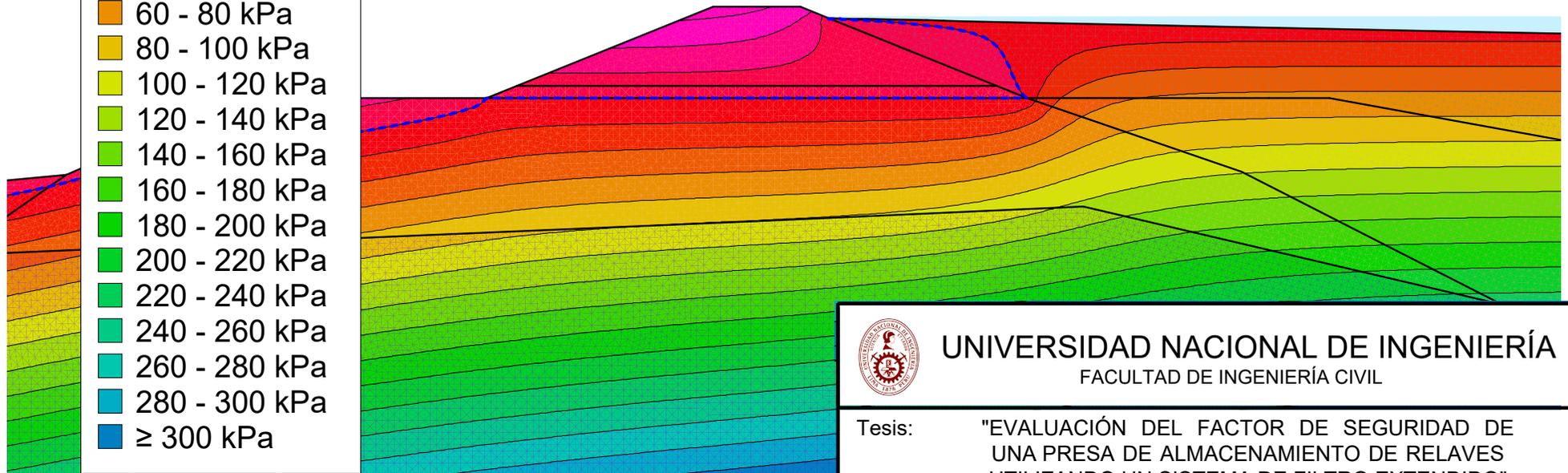
Longitud del dren horizontal: 25 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -60 - -40 kPa
- 40 - -20 kPa
- 20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa
- 180 - 200 kPa
- 200 - 220 kPa
- 220 - 240 kPa
- 240 - 260 kPa
- 260 - 280 kPa
- 280 - 300 kPa
- ≥ 300 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 7

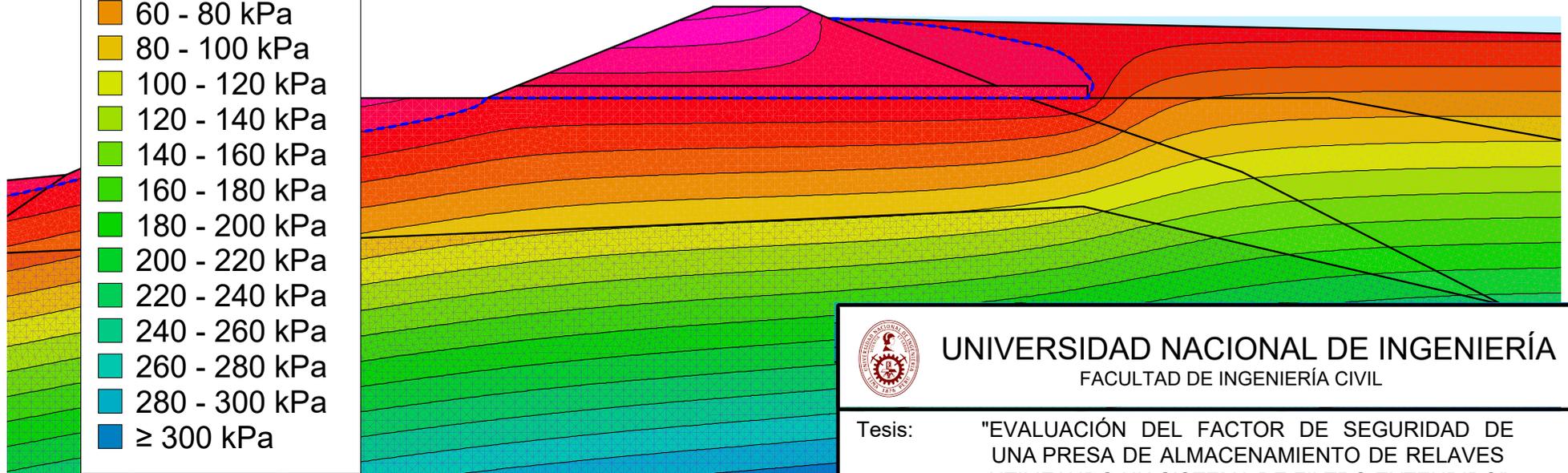
Longitud del dren aguas arriba: 0 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -60 - -40 kPa
- -40 - -20 kPa
- -20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa
- 180 - 200 kPa
- 200 - 220 kPa
- 220 - 240 kPa
- 240 - 260 kPa
- 260 - 280 kPa
- 280 - 300 kPa
- ≥ 300 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 8

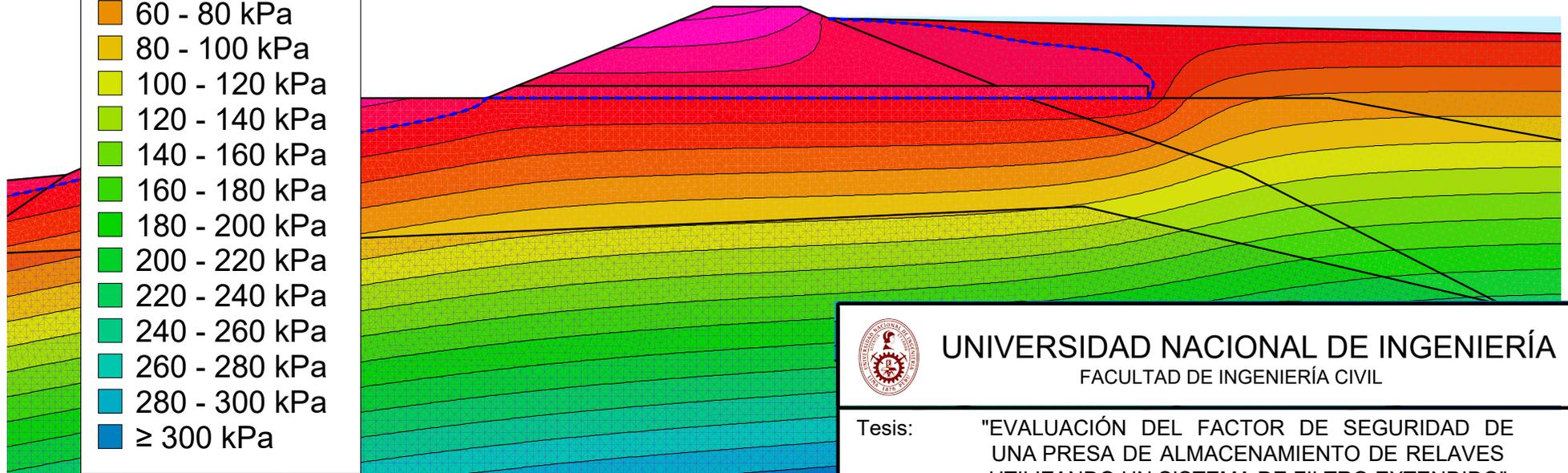
Longitud del dren aguas arriba: 5 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -60 - -40 kPa
- -40 - -20 kPa
- -20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa
- 180 - 200 kPa
- 200 - 220 kPa
- 220 - 240 kPa
- 240 - 260 kPa
- 260 - 280 kPa
- 280 - 300 kPa
- ≥ 300 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 9

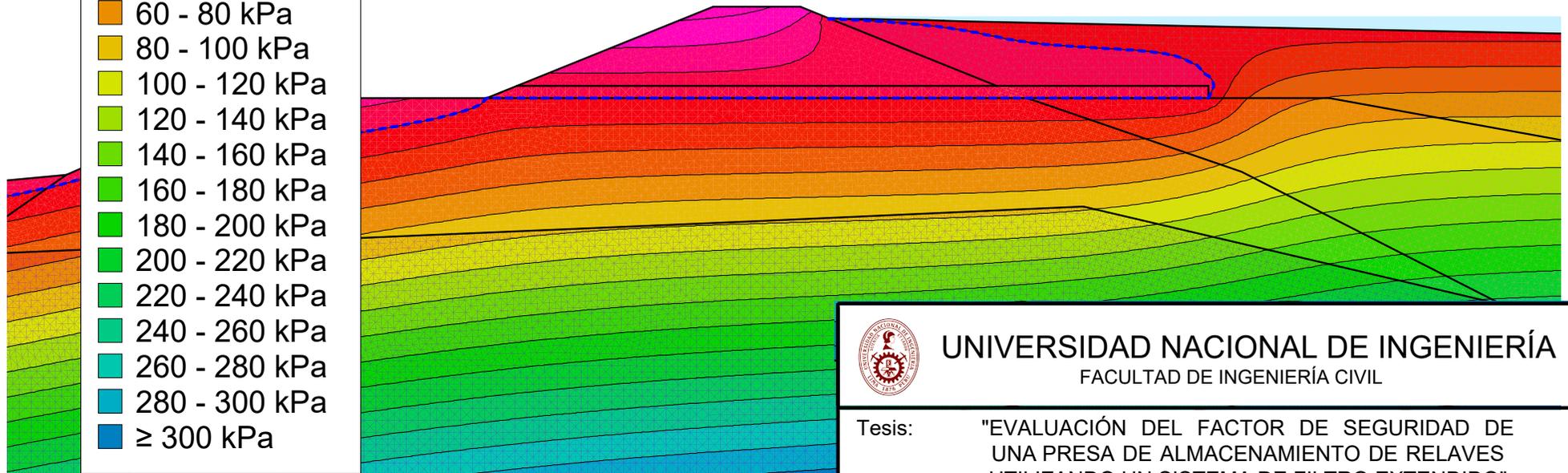
Longitud del dren aguas arriba: 10 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -60 - -40 kPa
- -40 - -20 kPa
- -20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa
- 180 - 200 kPa
- 200 - 220 kPa
- 220 - 240 kPa
- 240 - 260 kPa
- 260 - 280 kPa
- 280 - 300 kPa
- ≥ 300 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 10

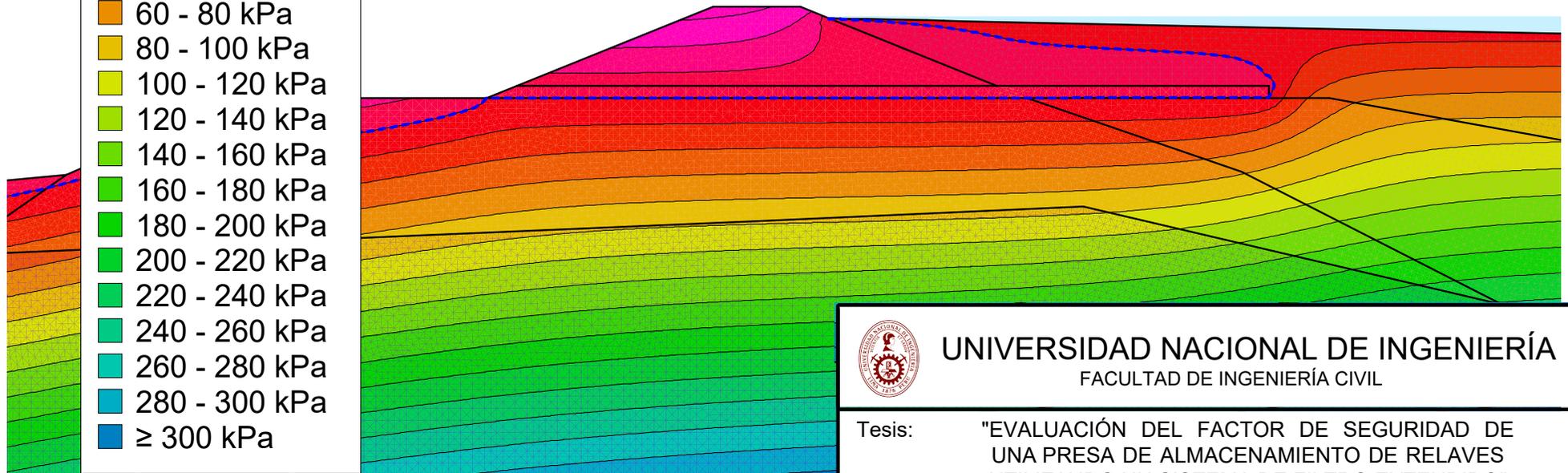
Longitud del dren aguas arriba: 15 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -60 - -40 kPa
- -40 - -20 kPa
- -20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa
- 180 - 200 kPa
- 200 - 220 kPa
- 220 - 240 kPa
- 240 - 260 kPa
- 260 - 280 kPa
- 280 - 300 kPa
- ≥ 300 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 11

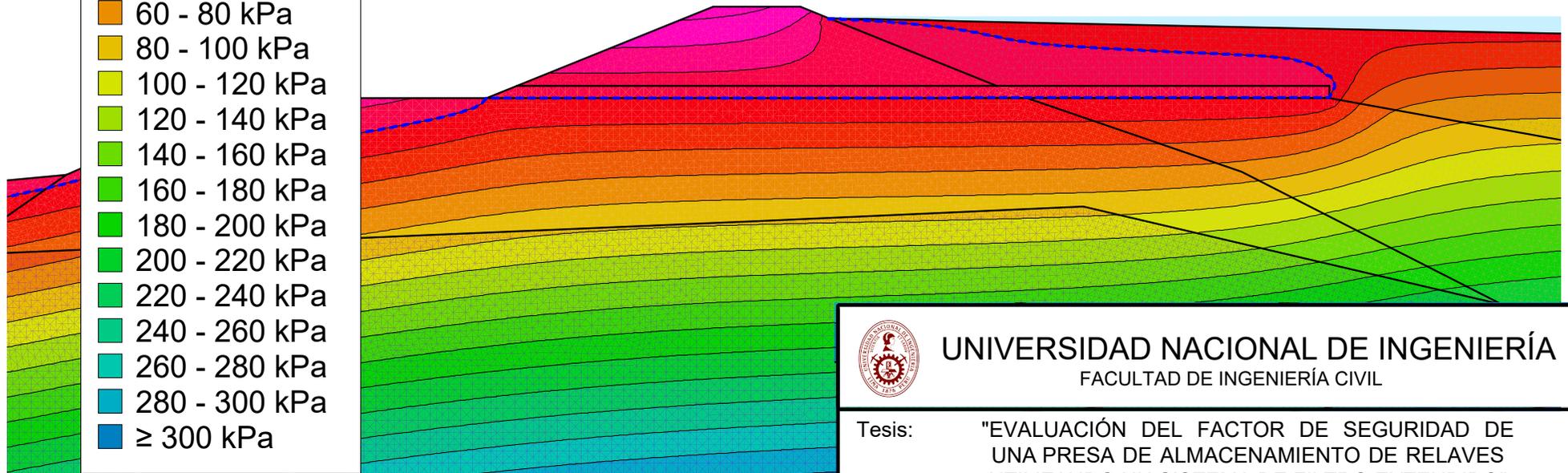
Longitud del dren aguas arriba: 20 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -60 - -40 kPa
- -40 - -20 kPa
- -20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa
- 180 - 200 kPa
- 200 - 220 kPa
- 220 - 240 kPa
- 240 - 260 kPa
- 260 - 280 kPa
- 280 - 300 kPa
- ≥ 300 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 12

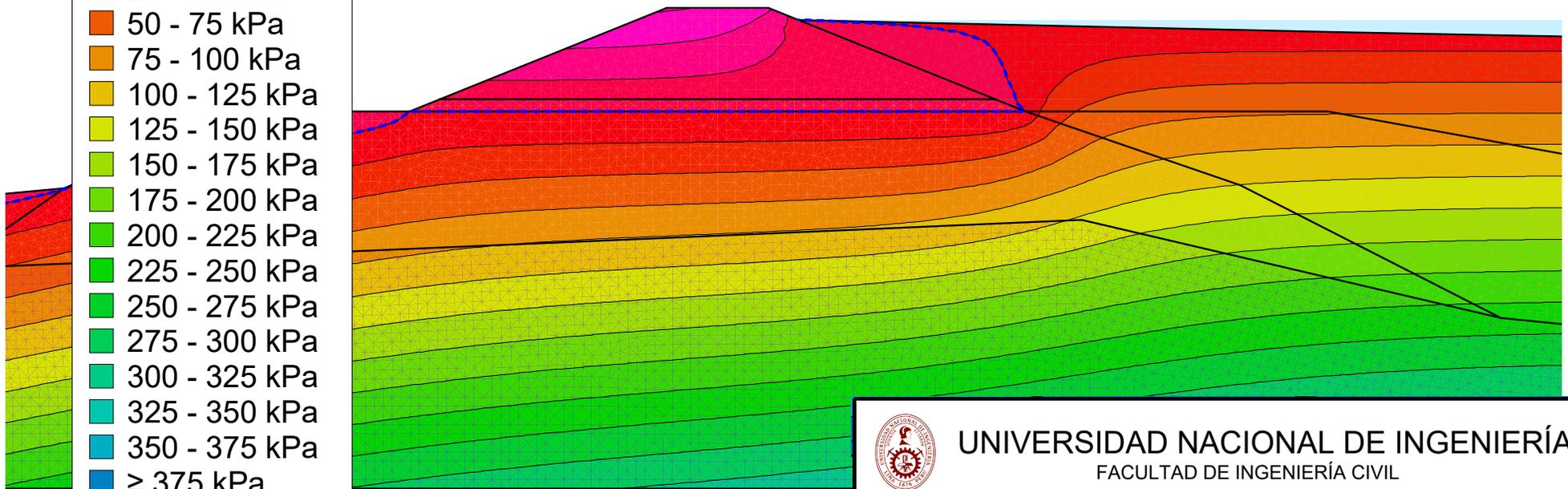
Longitud del dren aguas arriba: 25 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -75 - -50 kPa
- -50 - -25 kPa
- -25 - 0 kPa
- 0 - 25 kPa
- 25 - 50 kPa
- 50 - 75 kPa
- 75 - 100 kPa
- 100 - 125 kPa
- 125 - 150 kPa
- 150 - 175 kPa
- 175 - 200 kPa
- 200 - 225 kPa
- 225 - 250 kPa
- 250 - 275 kPa
- 275 - 300 kPa
- 300 - 325 kPa
- 325 - 350 kPa
- 350 - 375 kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m

Simulación N° 13

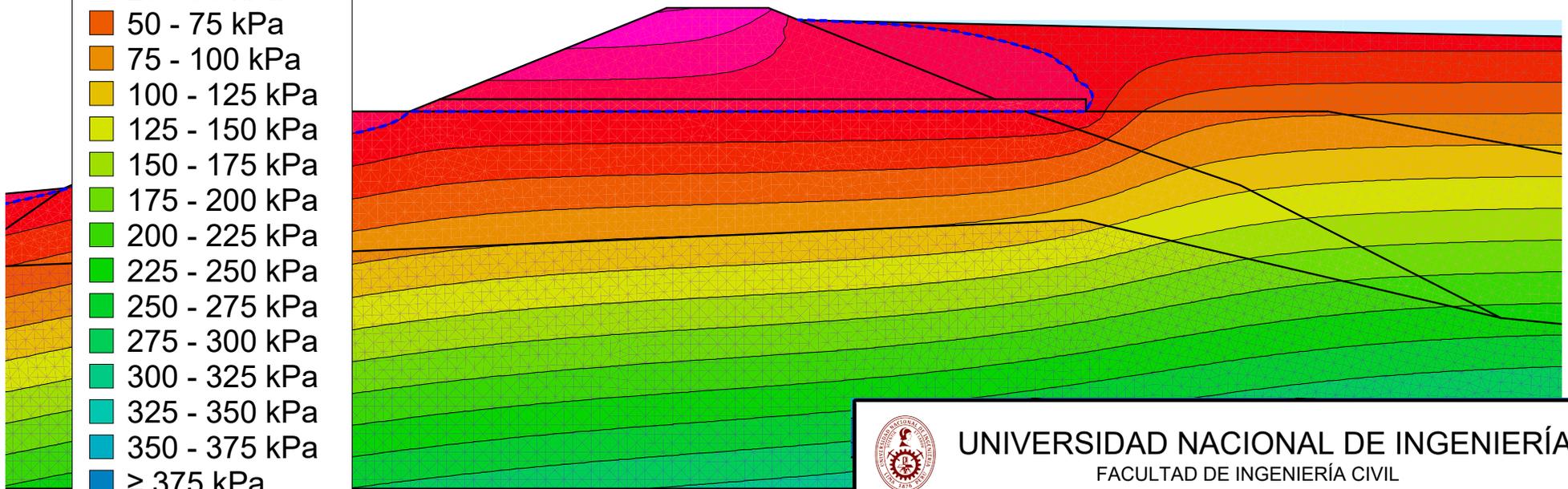
Longitud del filtro aguas arriba: 0 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -75 - -50$ kPa
- $-50 - -25$ kPa
- $-25 - 0$ kPa
- $0 - 25$ kPa
- $25 - 50$ kPa
- $50 - 75$ kPa
- $75 - 100$ kPa
- $100 - 125$ kPa
- $125 - 150$ kPa
- $150 - 175$ kPa
- $175 - 200$ kPa
- $200 - 225$ kPa
- $225 - 250$ kPa
- $250 - 275$ kPa
- $275 - 300$ kPa
- $300 - 325$ kPa
- $325 - 350$ kPa
- $350 - 375$ kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m

Simulación N° 14

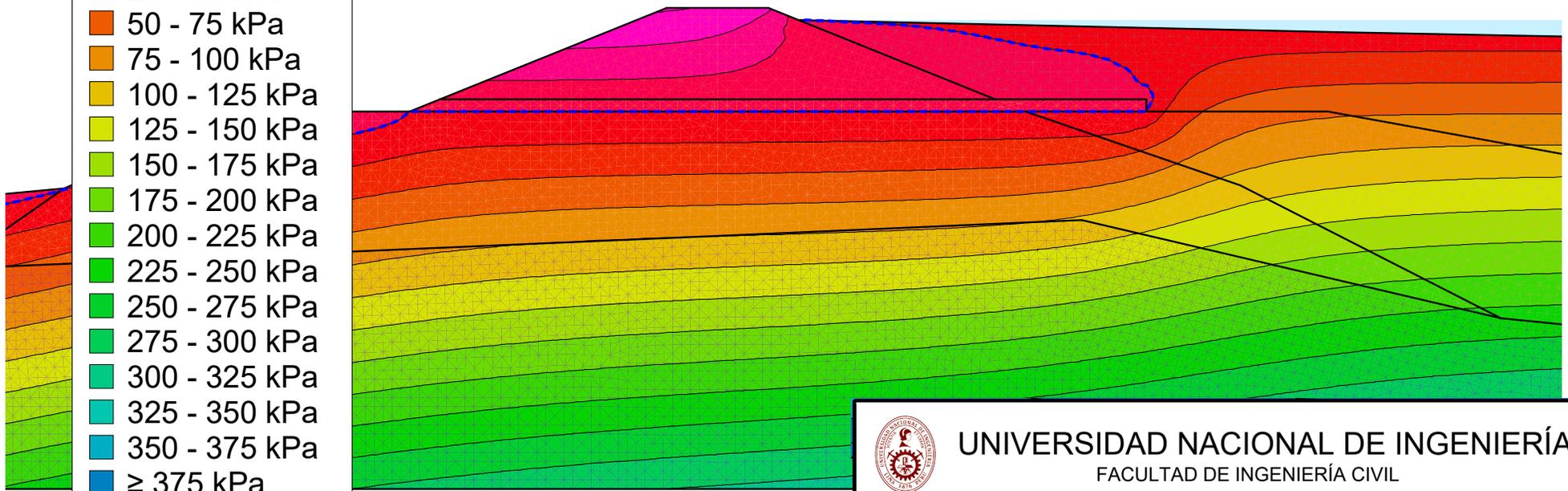
Longitud del filtro aguas arriba: 5 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -75 - -50 kPa
- -50 - -25 kPa
- -25 - 0 kPa
- 0 - 25 kPa
- 25 - 50 kPa
- 50 - 75 kPa
- 75 - 100 kPa
- 100 - 125 kPa
- 125 - 150 kPa
- 150 - 175 kPa
- 175 - 200 kPa
- 200 - 225 kPa
- 225 - 250 kPa
- 250 - 275 kPa
- 275 - 300 kPa
- 300 - 325 kPa
- 325 - 350 kPa
- 350 - 375 kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m

Simulación N° 15

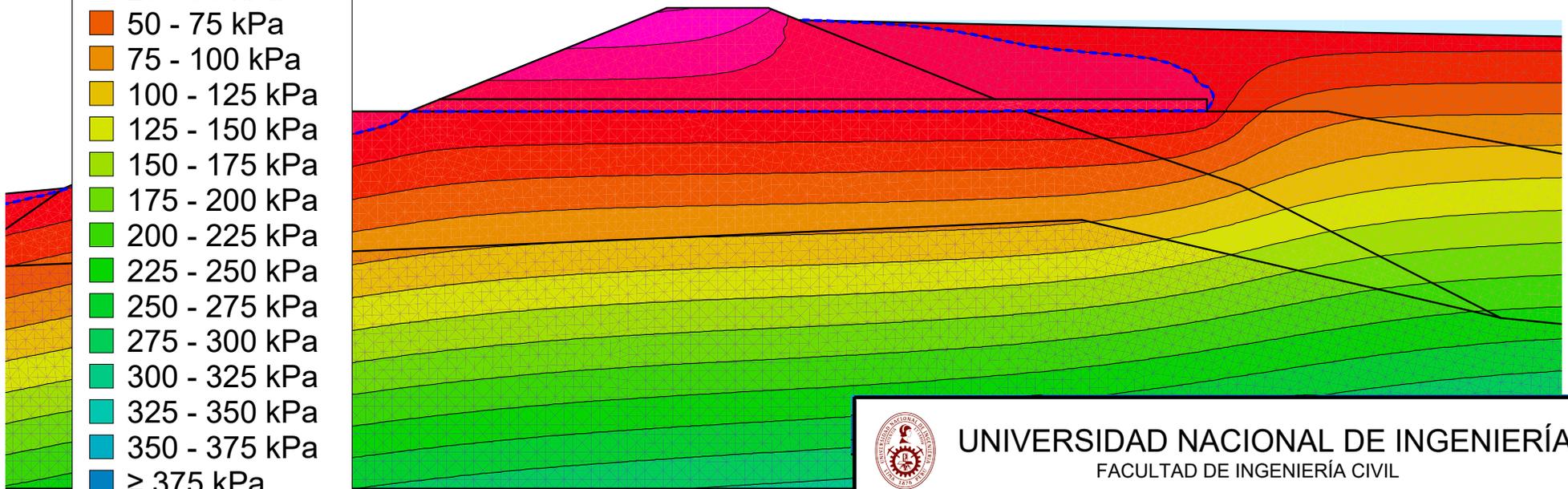
Longitud del filtro aguas arriba: 10 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -75 - -50 kPa
- -50 - -25 kPa
- -25 - 0 kPa
- 0 - 25 kPa
- 25 - 50 kPa
- 50 - 75 kPa
- 75 - 100 kPa
- 100 - 125 kPa
- 125 - 150 kPa
- 150 - 175 kPa
- 175 - 200 kPa
- 200 - 225 kPa
- 225 - 250 kPa
- 250 - 275 kPa
- 275 - 300 kPa
- 300 - 325 kPa
- 325 - 350 kPa
- 350 - 375 kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m

Simulación N° 16

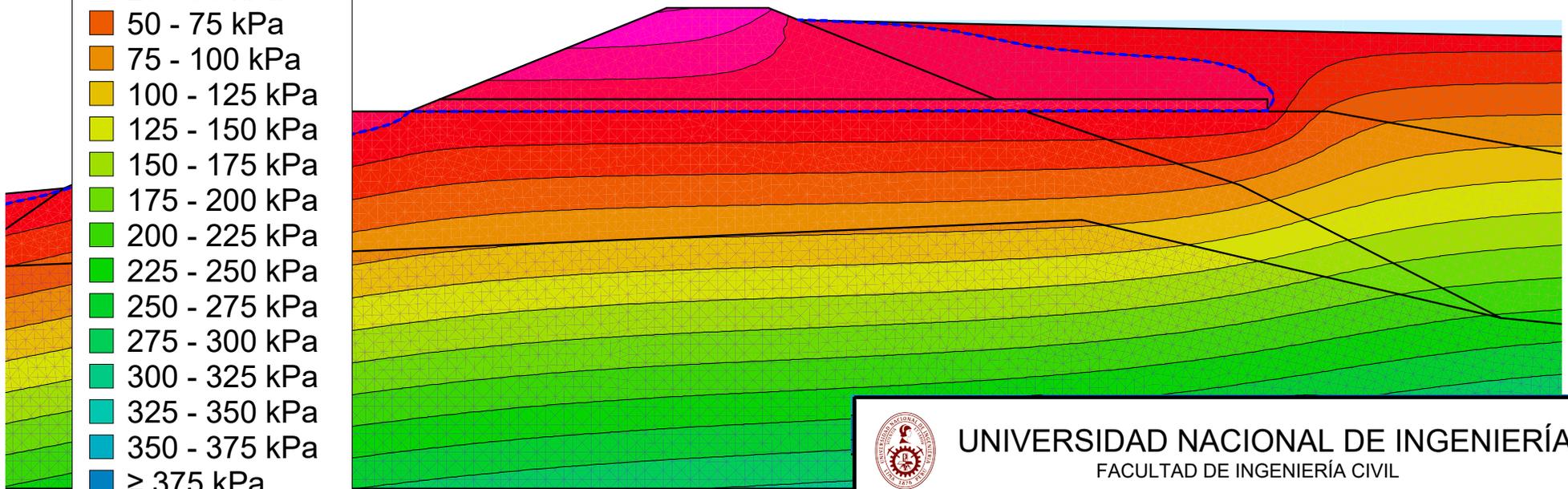
Longitud del filtro aguas arriba: 15 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -75 - -50$ kPa
- $-50 - -25$ kPa
- $-25 - 0$ kPa
- $0 - 25$ kPa
- $25 - 50$ kPa
- $50 - 75$ kPa
- $75 - 100$ kPa
- $100 - 125$ kPa
- $125 - 150$ kPa
- $150 - 175$ kPa
- $175 - 200$ kPa
- $200 - 225$ kPa
- $225 - 250$ kPa
- $250 - 275$ kPa
- $275 - 300$ kPa
- $300 - 325$ kPa
- $325 - 350$ kPa
- $350 - 375$ kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m

Simulación N° 17

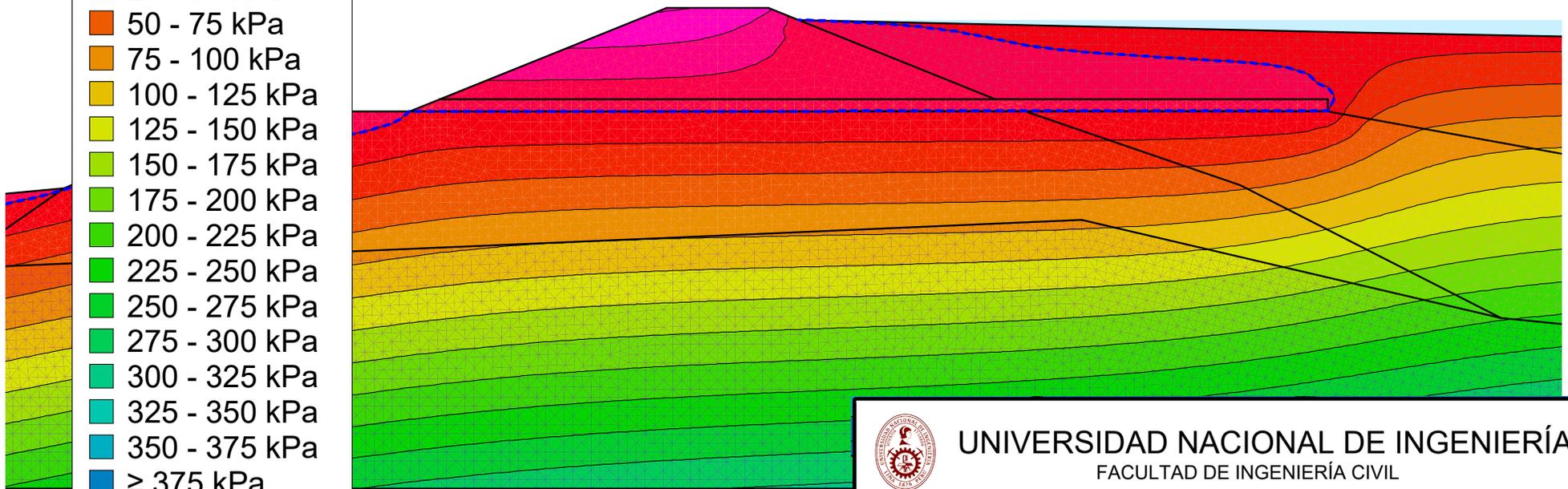
Longitud del filtro aguas arriba: 20 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -75 - -50 kPa
- -50 - -25 kPa
- -25 - 0 kPa
- 0 - 25 kPa
- 25 - 50 kPa
- 50 - 75 kPa
- 75 - 100 kPa
- 100 - 125 kPa
- 125 - 150 kPa
- 150 - 175 kPa
- 175 - 200 kPa
- 200 - 225 kPa
- 225 - 250 kPa
- 250 - 275 kPa
- 275 - 300 kPa
- 300 - 325 kPa
- 325 - 350 kPa
- 350 - 375 kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m

Simulación N° 18

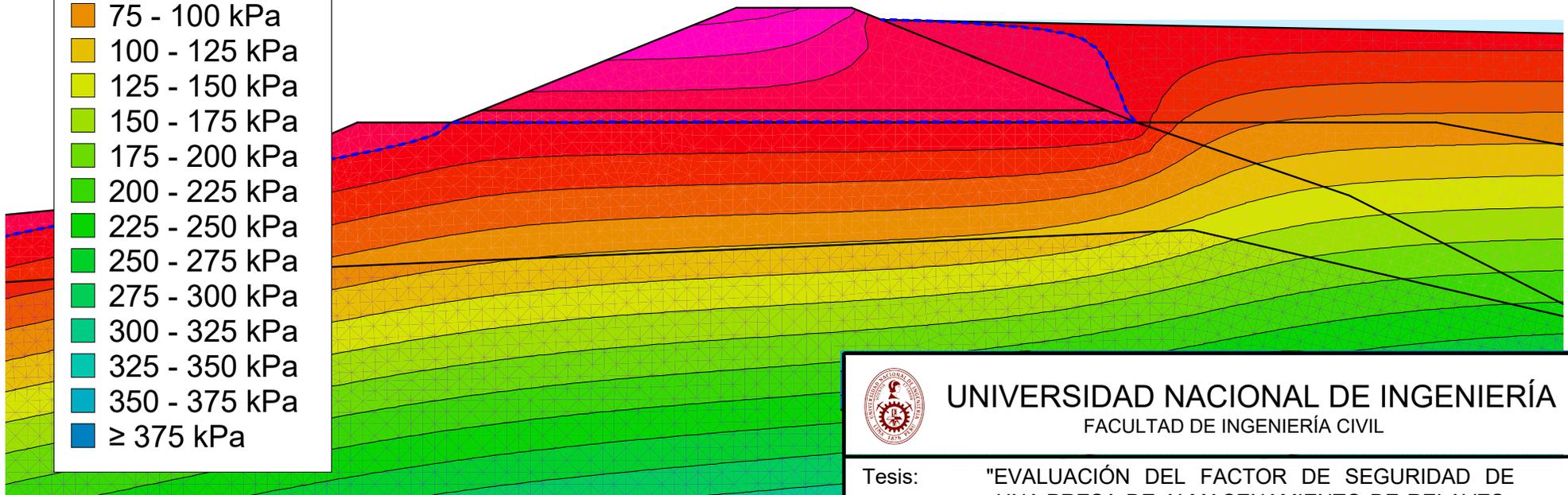
Longitud del filtro aguas arriba: 25 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- ≤ -75 - -50 kPa
- -50 - -25 kPa
- -25 - 0 kPa
- 0 - 25 kPa
- 25 - 50 kPa
- 50 - 75 kPa
- 75 - 100 kPa
- 100 - 125 kPa
- 125 - 150 kPa
- 150 - 175 kPa
- 175 - 200 kPa
- 200 - 225 kPa
- 225 - 250 kPa
- 250 - 275 kPa
- 275 - 300 kPa
- 300 - 325 kPa
- 325 - 350 kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 19

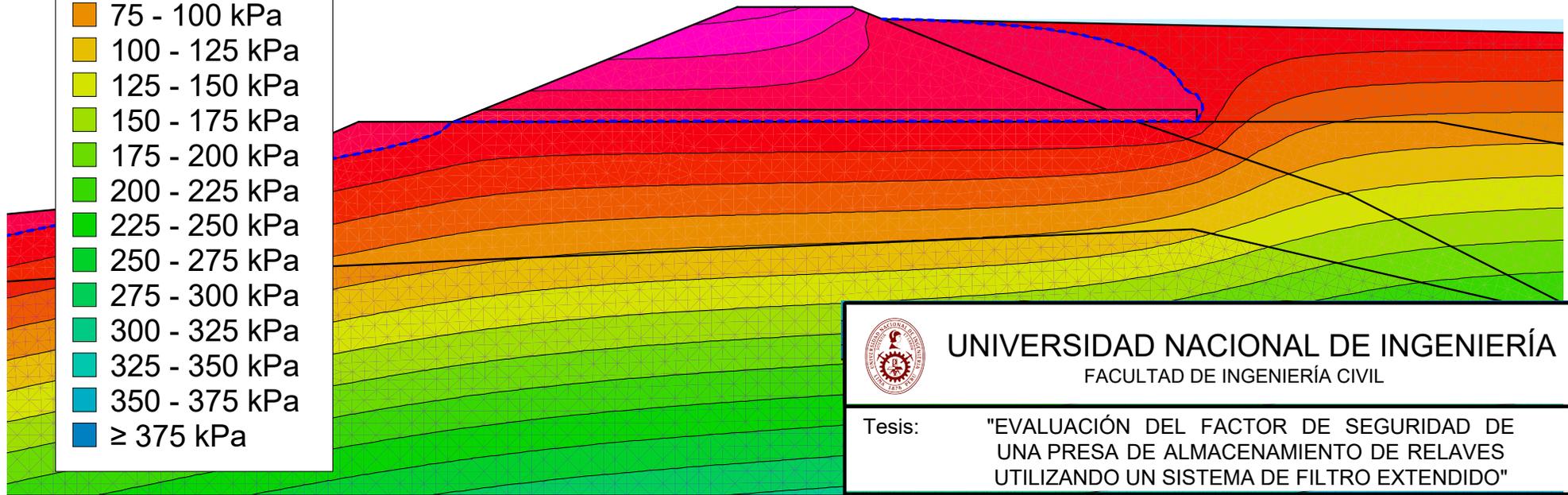
Longitud del filtro aguas arriba: 0 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -75 - -50$ kPa
- $-50 - -25$ kPa
- $-25 - 0$ kPa
- $0 - 25$ kPa
- $25 - 50$ kPa
- $50 - 75$ kPa
- $75 - 100$ kPa
- $100 - 125$ kPa
- $125 - 150$ kPa
- $150 - 175$ kPa
- $175 - 200$ kPa
- $200 - 225$ kPa
- $225 - 250$ kPa
- $250 - 275$ kPa
- $275 - 300$ kPa
- $300 - 325$ kPa
- $325 - 350$ kPa
- $350 - 375$ kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

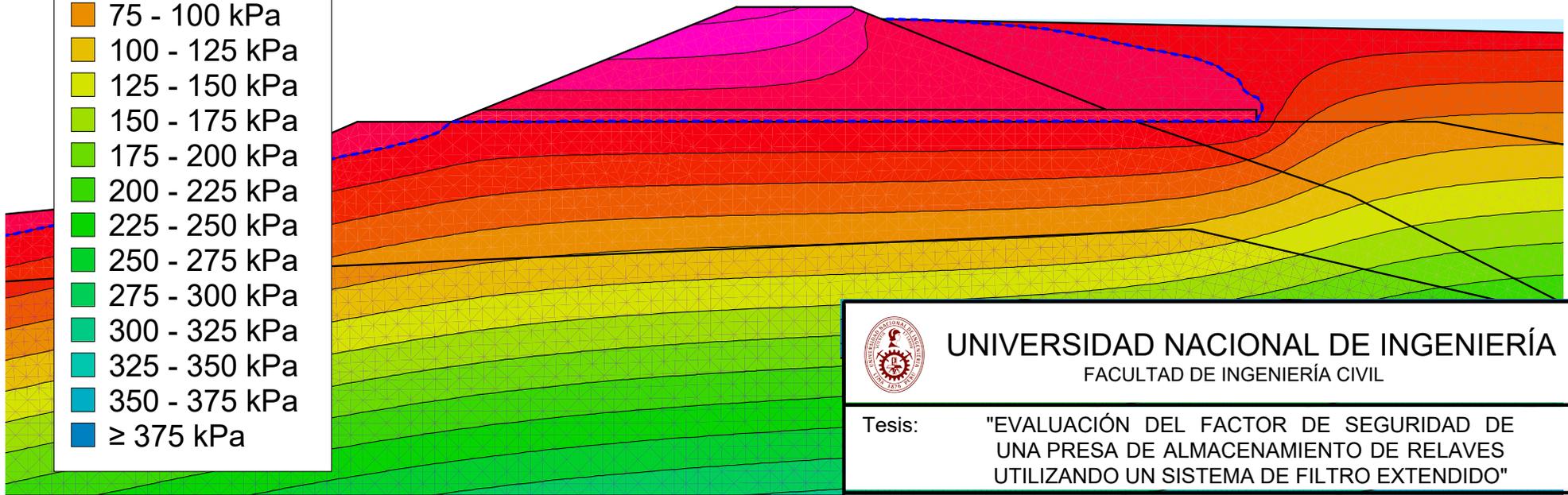
Altura de la presa: 9.5 m Simulación N° 20

Longitud del filtro aguas arriba: 5 m Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -75 - -50$ kPa
- $-50 - -25$ kPa
- $-25 - 0$ kPa
- $0 - 25$ kPa
- $25 - 50$ kPa
- $50 - 75$ kPa
- $75 - 100$ kPa
- $100 - 125$ kPa
- $125 - 150$ kPa
- $150 - 175$ kPa
- $175 - 200$ kPa
- $200 - 225$ kPa
- $225 - 250$ kPa
- $250 - 275$ kPa
- $275 - 300$ kPa
- $300 - 325$ kPa
- $325 - 350$ kPa
- $350 - 375$ kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 21

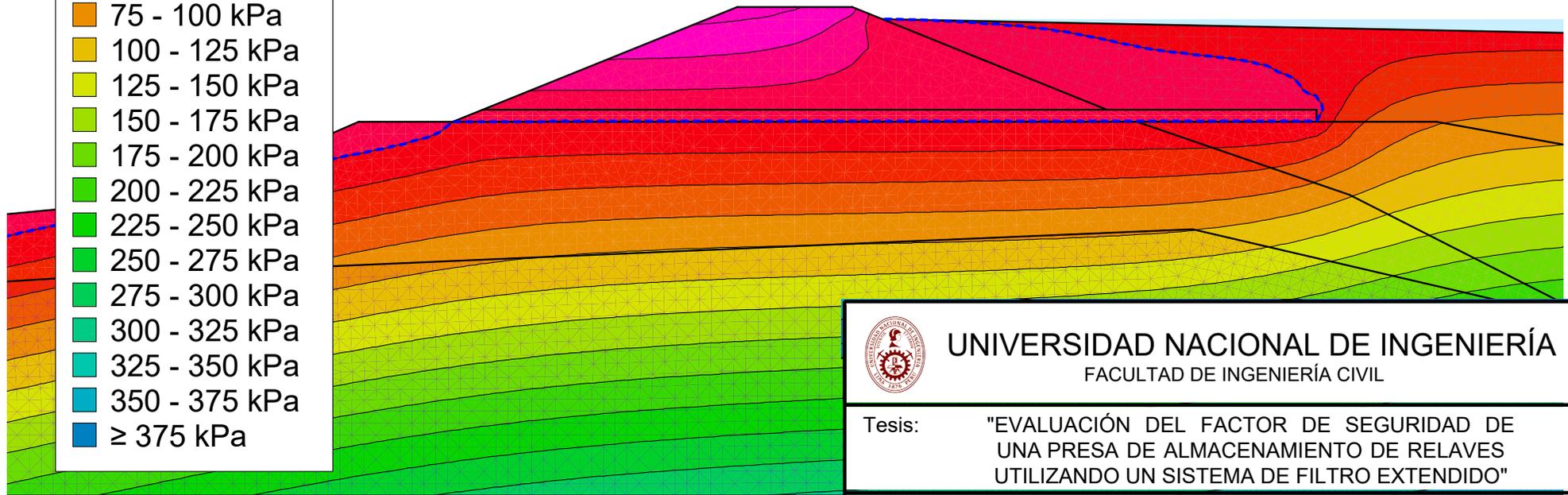
Longitud del filtro aguas arriba: 10 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -75 - -50$ kPa
- $-50 - -25$ kPa
- $-25 - 0$ kPa
- $0 - 25$ kPa
- $25 - 50$ kPa
- $50 - 75$ kPa
- $75 - 100$ kPa
- $100 - 125$ kPa
- $125 - 150$ kPa
- $150 - 175$ kPa
- $175 - 200$ kPa
- $200 - 225$ kPa
- $225 - 250$ kPa
- $250 - 275$ kPa
- $275 - 300$ kPa
- $300 - 325$ kPa
- $325 - 350$ kPa
- $350 - 375$ kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

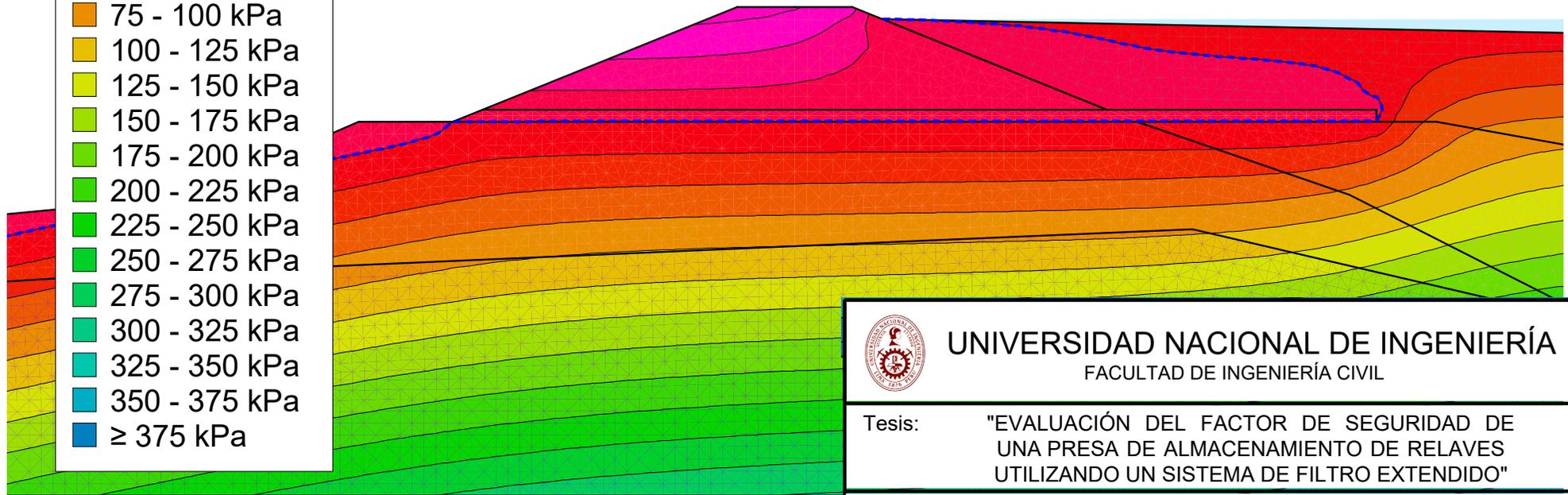
Altura de la presa: 9.5 m Simulación N° 22

Longitud del filtro aguas arriba: 15 m Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -75 - -50$ kPa
- $-50 - -25$ kPa
- $-25 - 0$ kPa
- $0 - 25$ kPa
- $25 - 50$ kPa
- $50 - 75$ kPa
- $75 - 100$ kPa
- $100 - 125$ kPa
- $125 - 150$ kPa
- $150 - 175$ kPa
- $175 - 200$ kPa
- $200 - 225$ kPa
- $225 - 250$ kPa
- $250 - 275$ kPa
- $275 - 300$ kPa
- $300 - 325$ kPa
- $325 - 350$ kPa
- $350 - 375$ kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 23

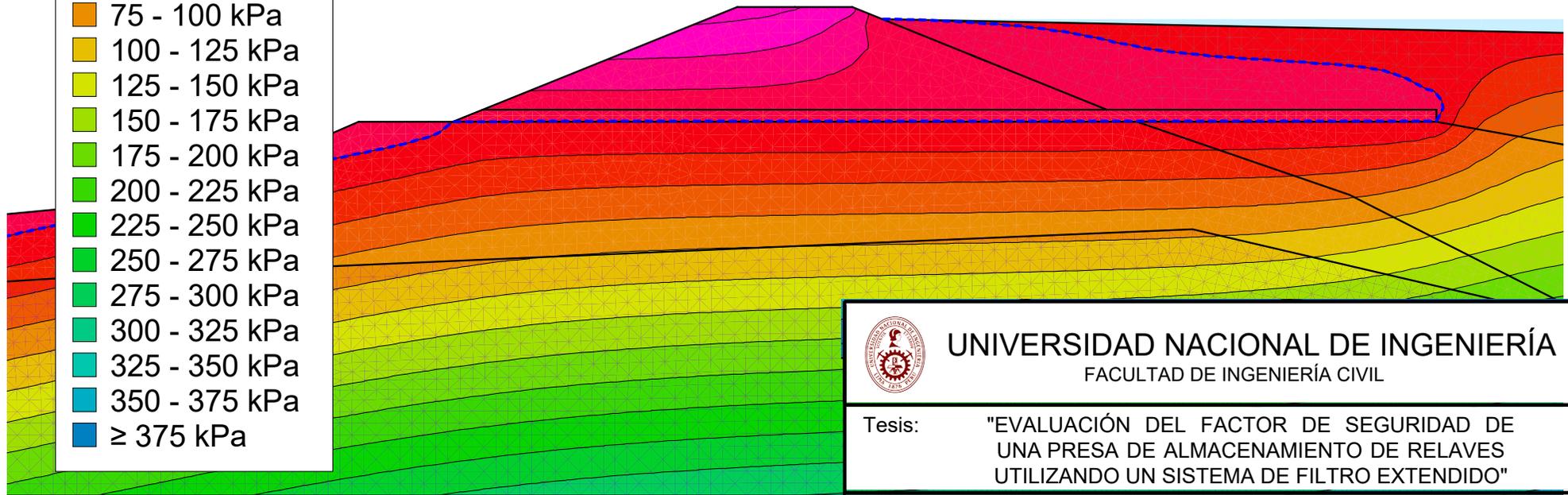
Longitud del filtro aguas arriba: 20 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -75 - -50$ kPa
- $-50 - -25$ kPa
- $-25 - 0$ kPa
- $0 - 25$ kPa
- $25 - 50$ kPa
- $50 - 75$ kPa
- $75 - 100$ kPa
- $100 - 125$ kPa
- $125 - 150$ kPa
- $150 - 175$ kPa
- $175 - 200$ kPa
- $200 - 225$ kPa
- $225 - 250$ kPa
- $250 - 275$ kPa
- $275 - 300$ kPa
- $300 - 325$ kPa
- $325 - 350$ kPa
- $350 - 375$ kPa
- ≥ 375 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

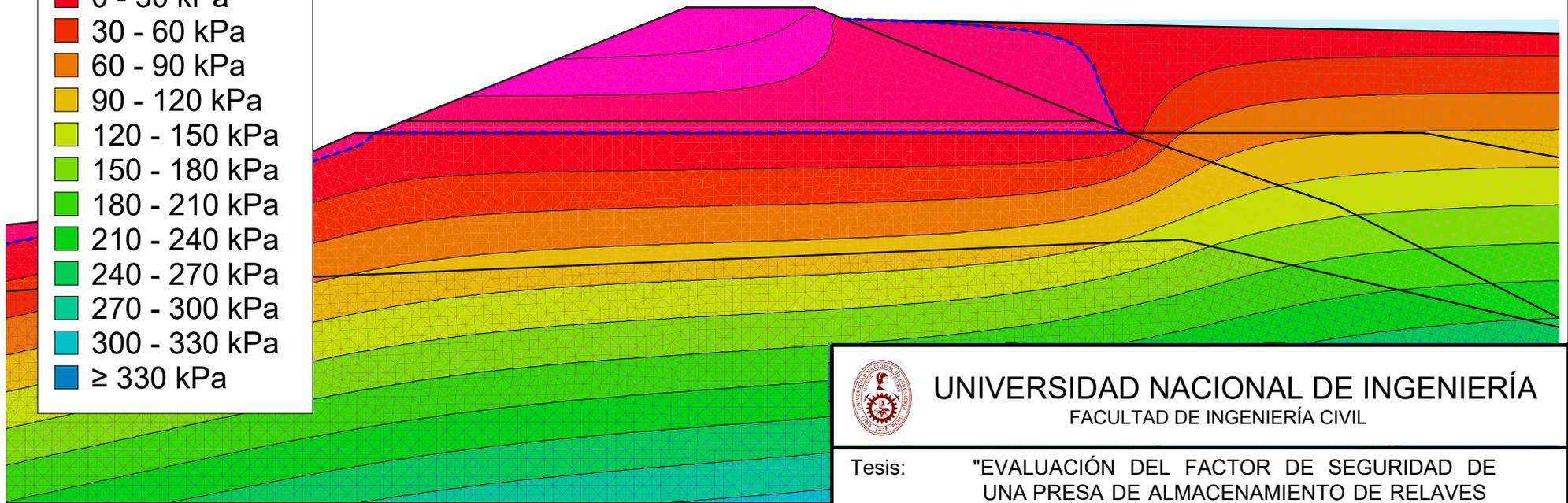
Altura de la presa: 9.5 m Simulación N° 24

Longitud del filtro aguas arriba: 25 m Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -60 - -30$ kPa
- $-30 - 0$ kPa
- $0 - 30$ kPa
- $30 - 60$ kPa
- $60 - 90$ kPa
- $90 - 120$ kPa
- $120 - 150$ kPa
- $150 - 180$ kPa
- $180 - 210$ kPa
- $210 - 240$ kPa
- $240 - 270$ kPa
- $270 - 300$ kPa
- $300 - 330$ kPa
- ≥ 330 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 25

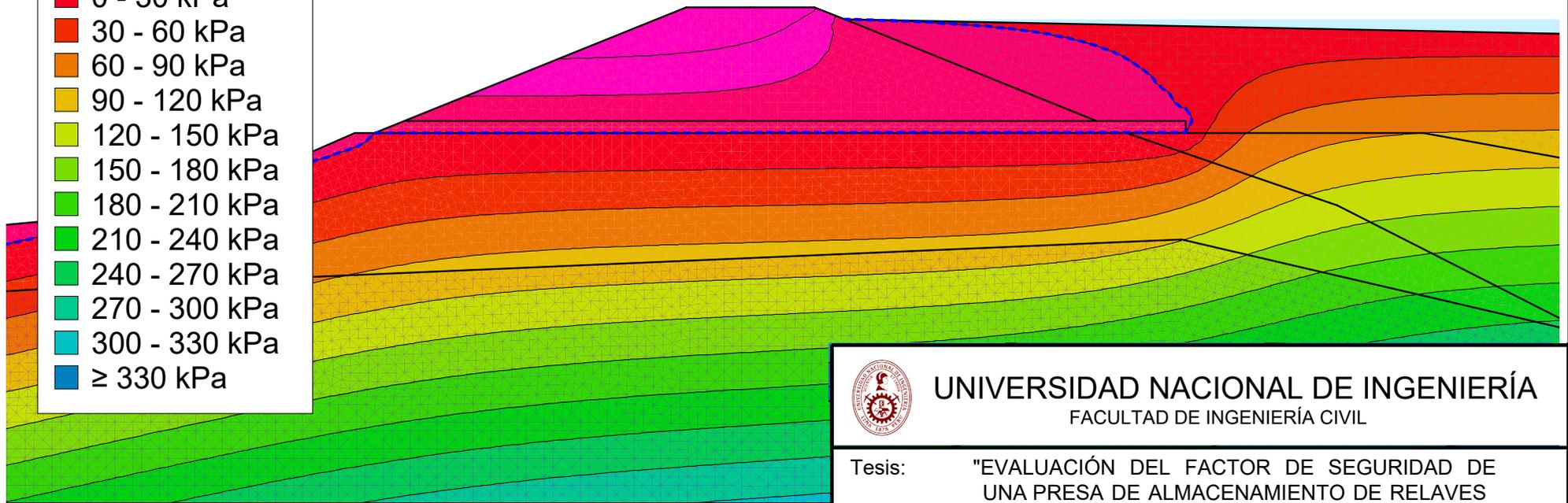
Longitud del filtro aguas arriba: 0 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -60 - -30$ kPa
- $-30 - 0$ kPa
- $0 - 30$ kPa
- $30 - 60$ kPa
- $60 - 90$ kPa
- $90 - 120$ kPa
- $120 - 150$ kPa
- $150 - 180$ kPa
- $180 - 210$ kPa
- $210 - 240$ kPa
- $240 - 270$ kPa
- $270 - 300$ kPa
- $300 - 330$ kPa
- ≥ 330 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 26

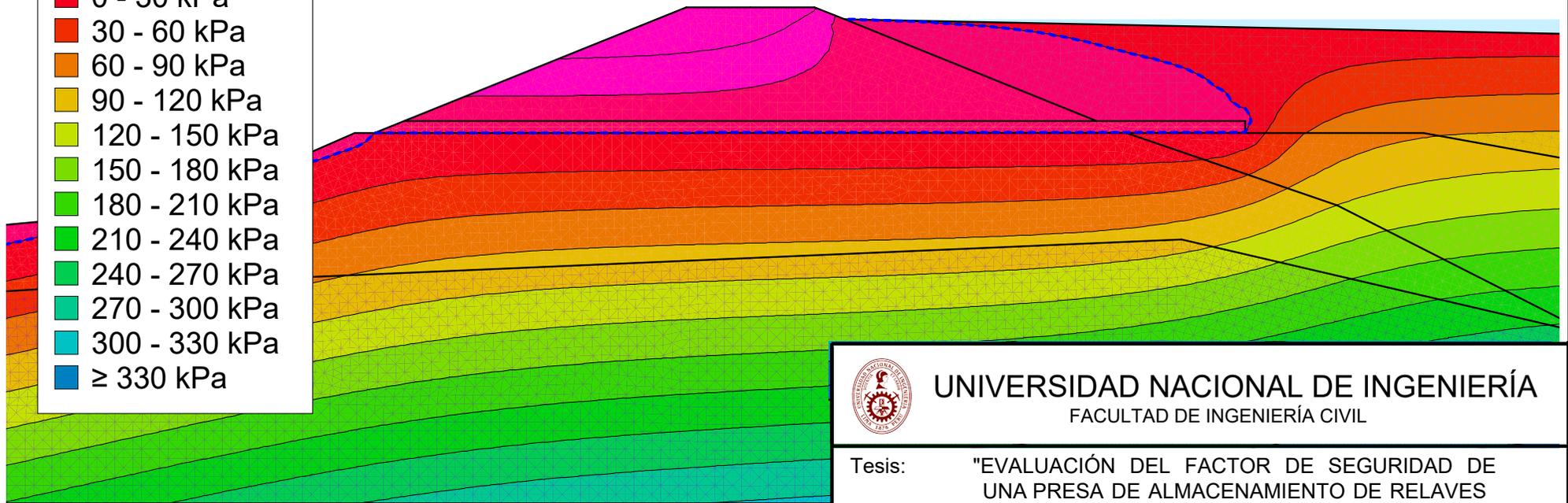
Longitud del filtro aguas arriba: 5 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -60 - -30$ kPa
- $-30 - 0$ kPa
- $0 - 30$ kPa
- $30 - 60$ kPa
- $60 - 90$ kPa
- $90 - 120$ kPa
- $120 - 150$ kPa
- $150 - 180$ kPa
- $180 - 210$ kPa
- $210 - 240$ kPa
- $240 - 270$ kPa
- $270 - 300$ kPa
- $300 - 330$ kPa
- ≥ 330 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 27

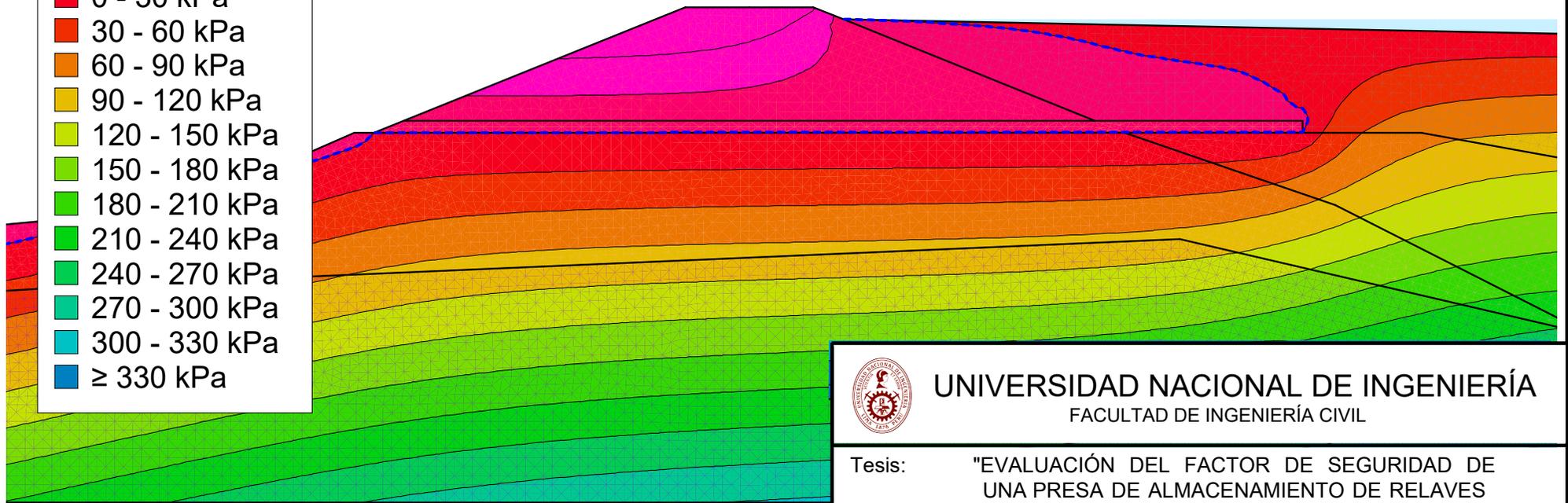
Longitud del filtro aguas arriba: 10 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -60 - -30$ kPa
- $-30 - 0$ kPa
- $0 - 30$ kPa
- $30 - 60$ kPa
- $60 - 90$ kPa
- $90 - 120$ kPa
- $120 - 150$ kPa
- $150 - 180$ kPa
- $180 - 210$ kPa
- $210 - 240$ kPa
- $240 - 270$ kPa
- $270 - 300$ kPa
- ≥ 330 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 28

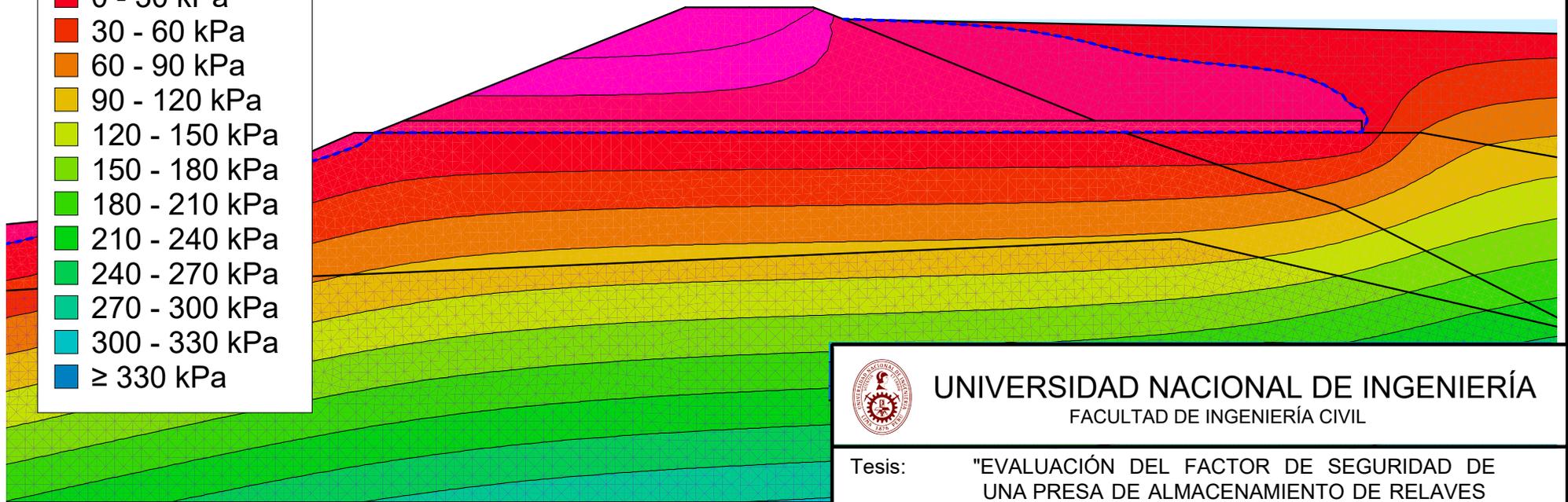
Longitud del filtro aguas arriba: 15 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -60 - -30$ kPa
- $-30 - 0$ kPa
- $0 - 30$ kPa
- $30 - 60$ kPa
- $60 - 90$ kPa
- $90 - 120$ kPa
- $120 - 150$ kPa
- $150 - 180$ kPa
- $180 - 210$ kPa
- $210 - 240$ kPa
- $240 - 270$ kPa
- $270 - 300$ kPa
- $300 - 330$ kPa
- ≥ 330 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 29

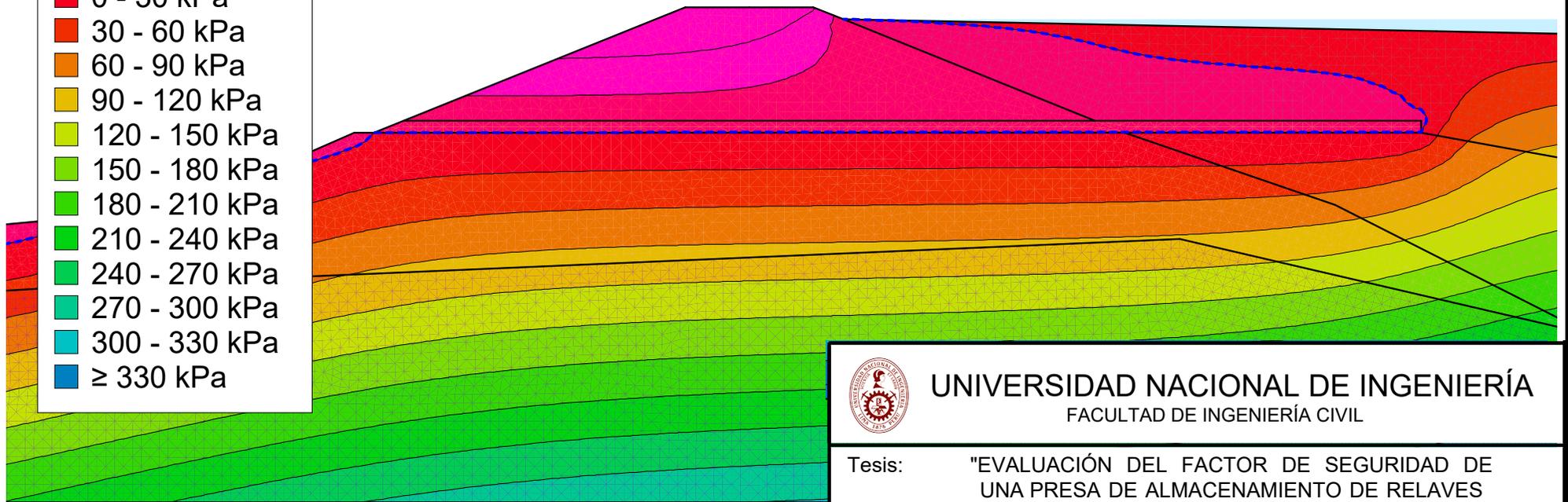
Longitud del filtro aguas arriba: 20 m

Escala: 1:500

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN
FLUJO PERMANENTE

Presión de Poros

- $\leq -60 - -30$ kPa
- $-30 - 0$ kPa
- $0 - 30$ kPa
- $30 - 60$ kPa
- $60 - 90$ kPa
- $90 - 120$ kPa
- $120 - 150$ kPa
- $150 - 180$ kPa
- $180 - 210$ kPa
- $210 - 240$ kPa
- $240 - 270$ kPa
- $270 - 300$ kPa
- $300 - 330$ kPa
- ≥ 330 kPa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 30

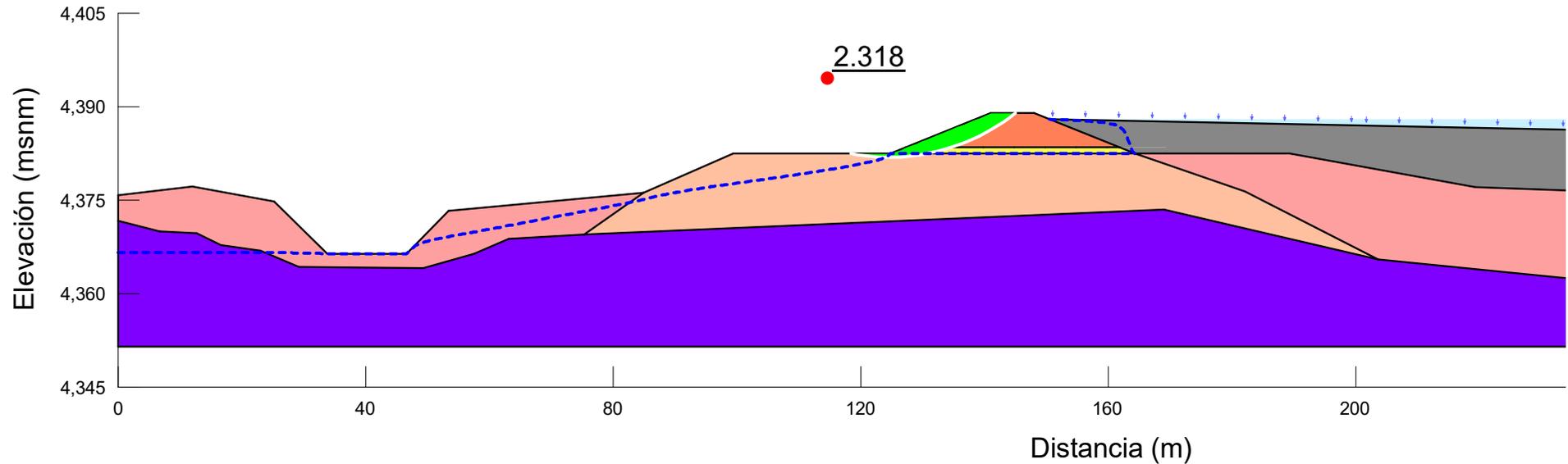
Longitud del filtro aguas arriba: 25 m

Escala: 1:500

ANEXO 2

Resultados del análisis de estabilidad de las 30 simulaciones

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

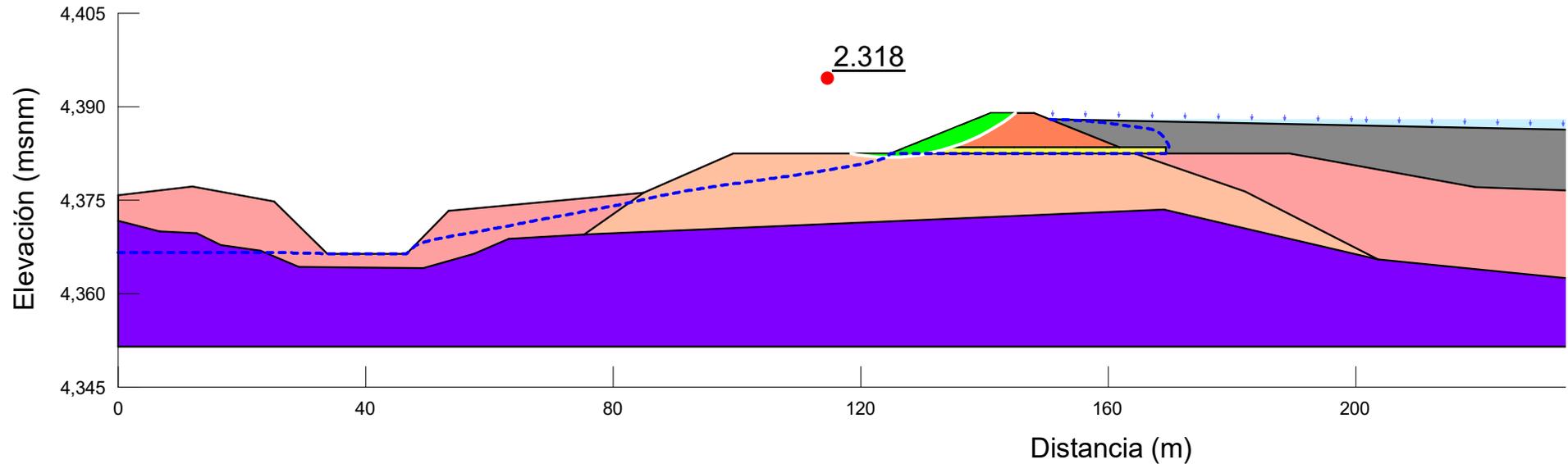
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtrol

Altura de la presa: 6.5 m Simulación N°1

Longitud del dren horizontal: 0 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

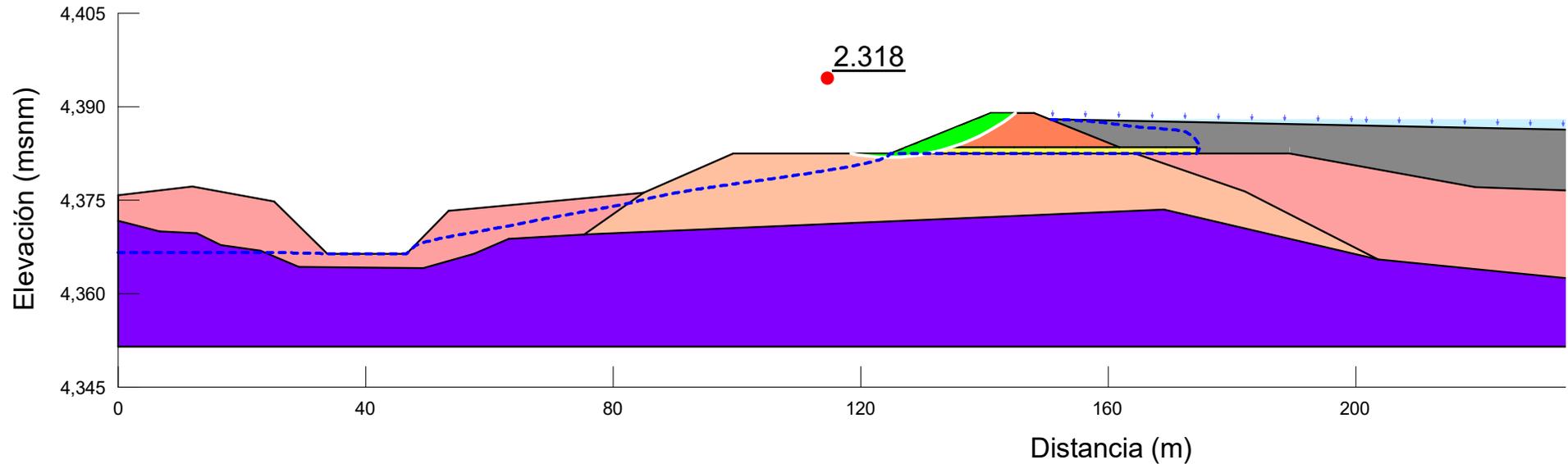
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m Simulación N°2

Longitud del dren horizontal: 5 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

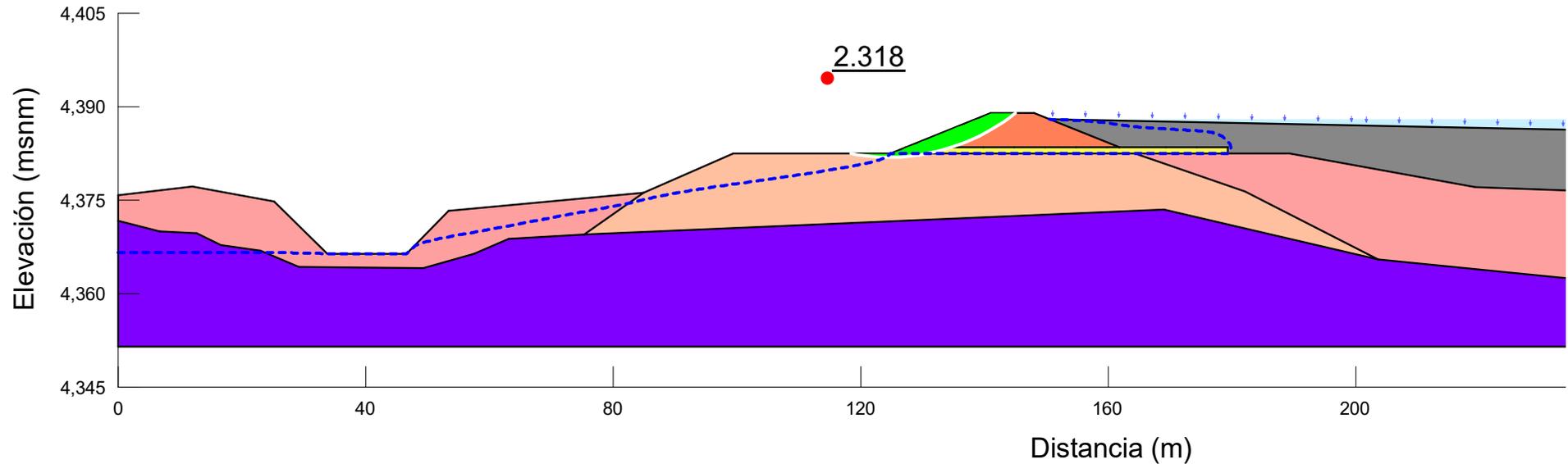
Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°3

Longitud del dren horizontal: 10 m

Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

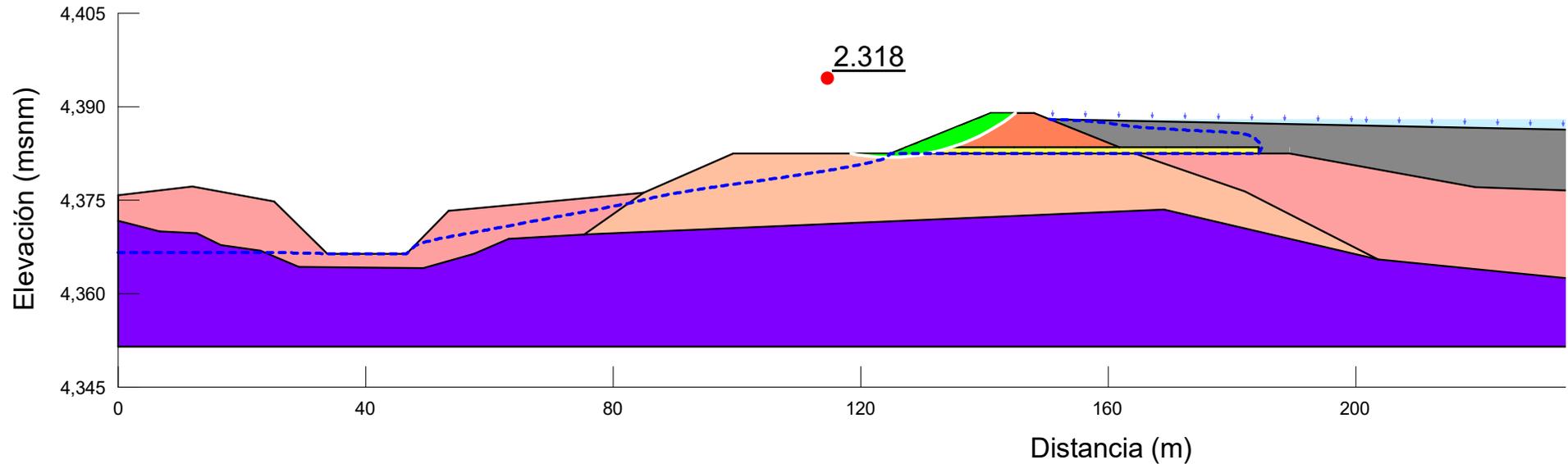
Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°4

Longitud del dren horizontal: 15 m

Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

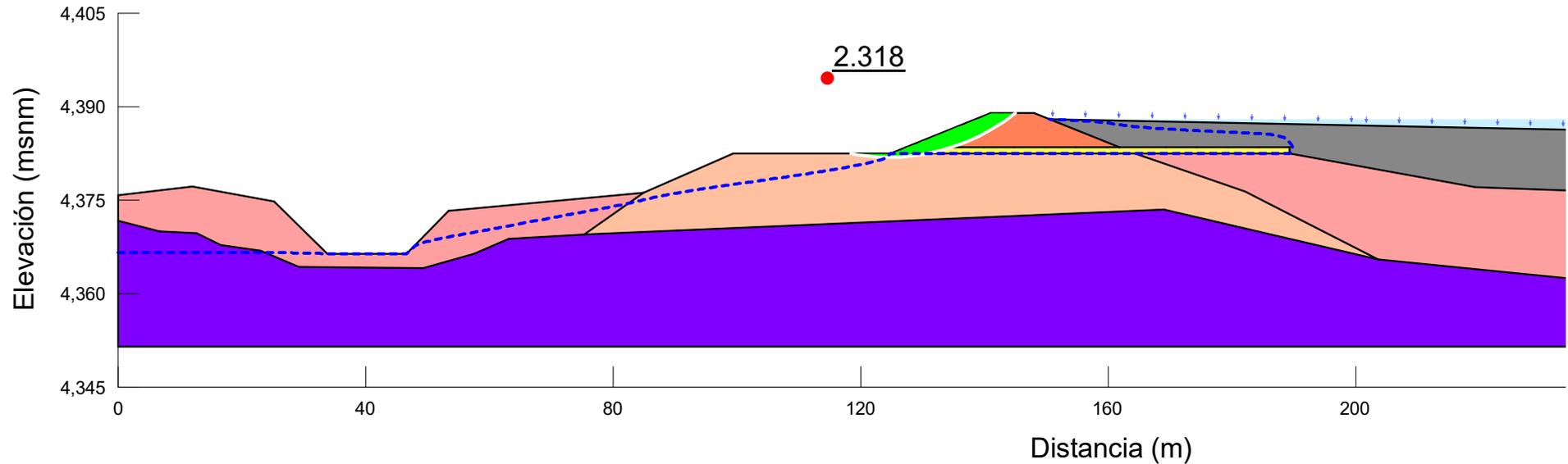
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m Simulación N°5

Longitud del dren horizontal: 20 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

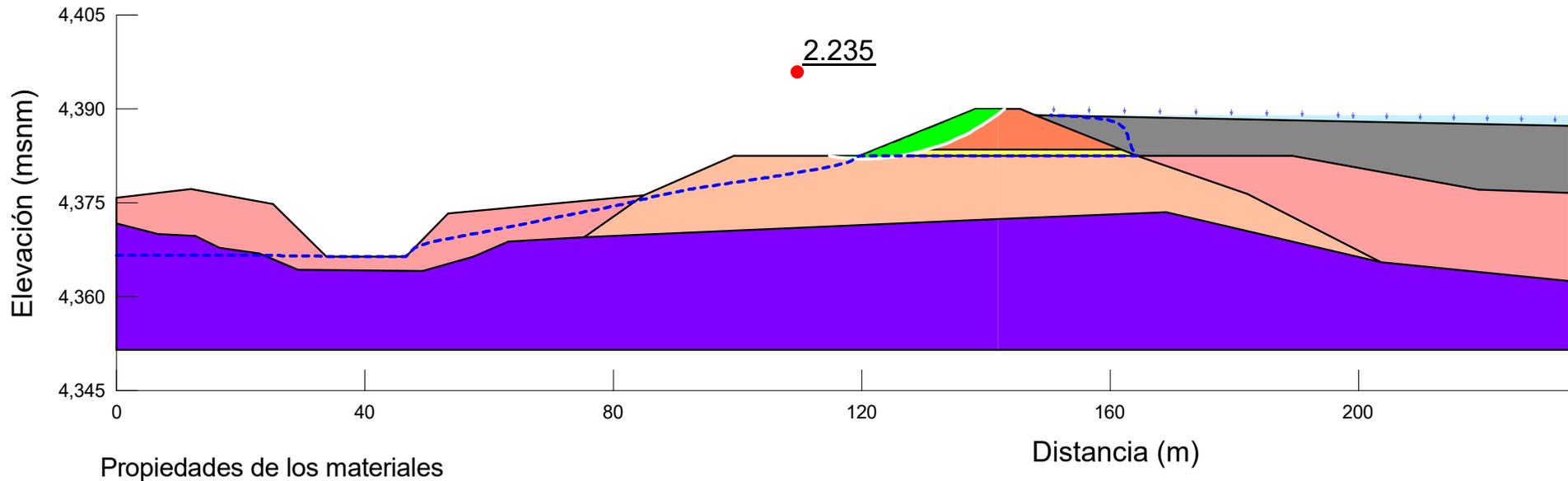
Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°6

Longitud del dren horizontal: 25 m

Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

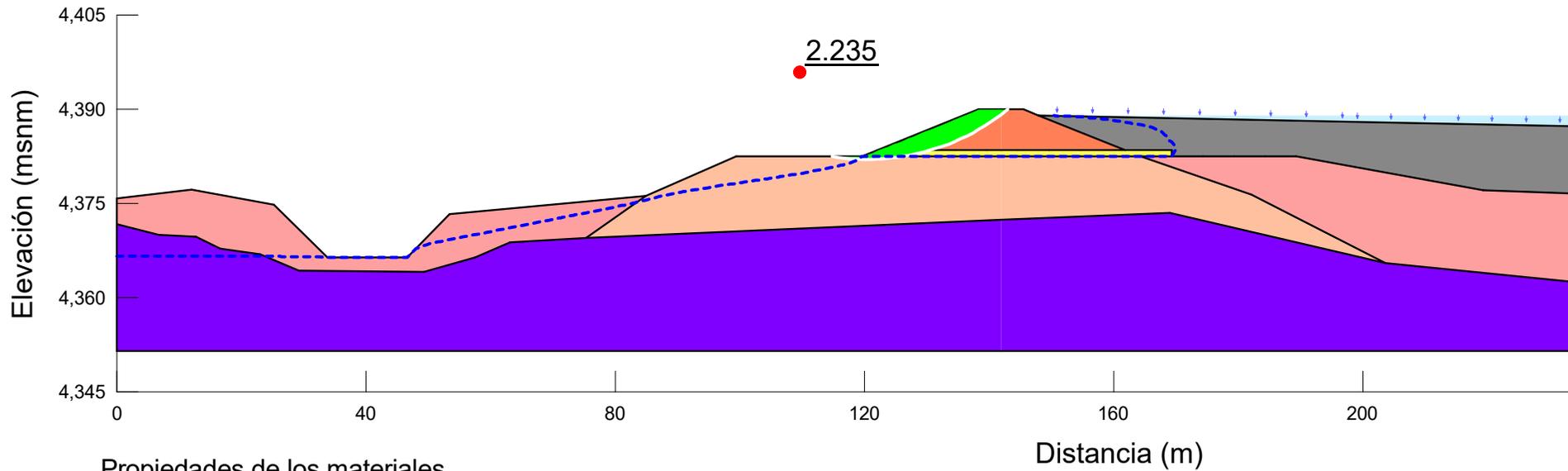
Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 7

Longitud del dren aguas arriba: 0 m

Escala: 1:1,000

**PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA**



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

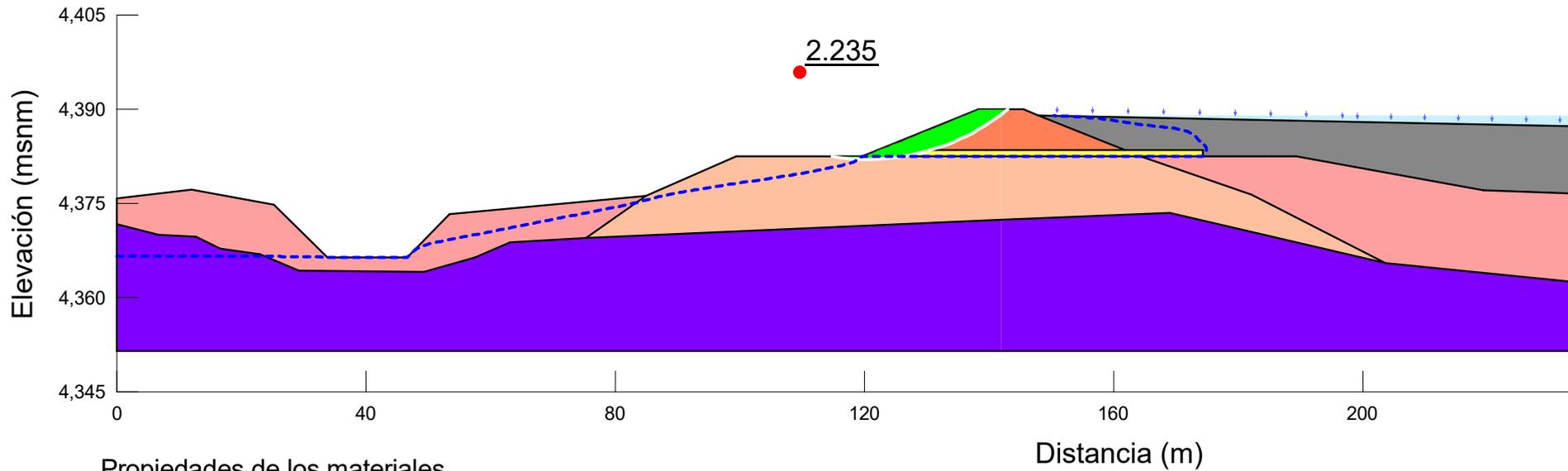
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m Simulación N° 8

Longitud del dren aguas arriba: 5 m Escala: 1:1,000

**PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA**



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

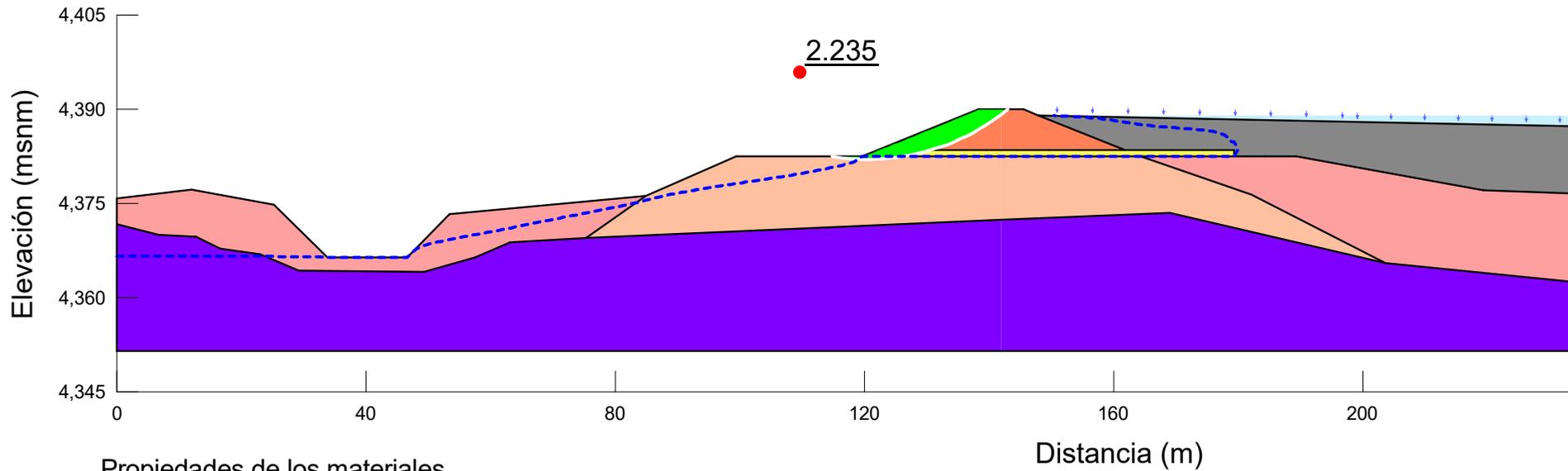
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m Simulación N° 9

Longitud del dren aguas arriba: 10 m Escala: 1:1,000

**PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA**



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

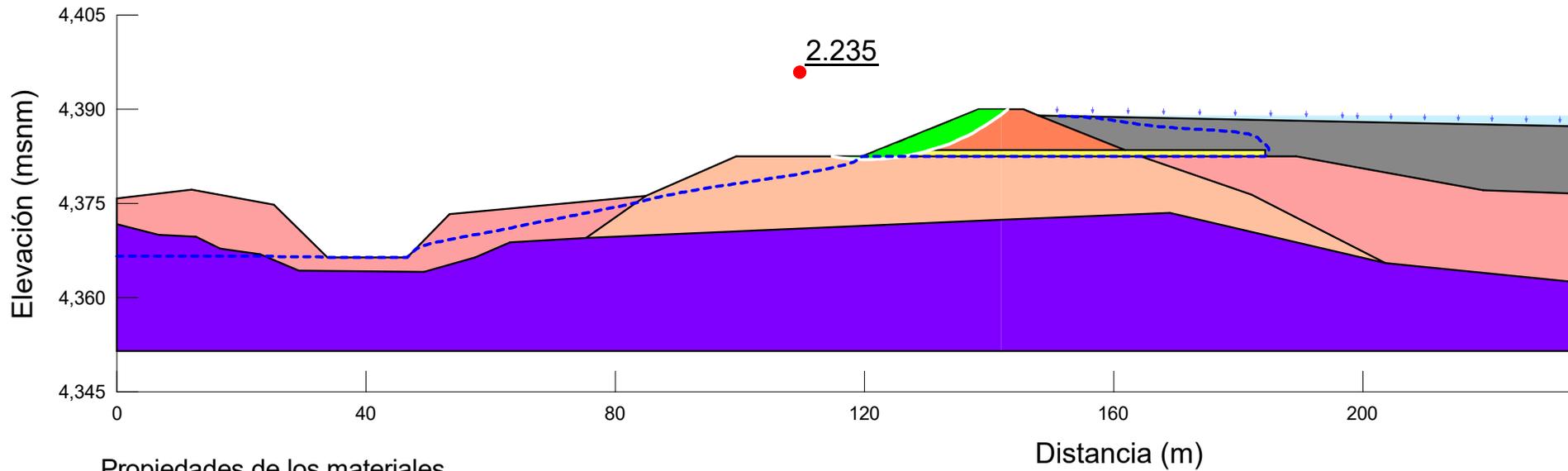
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m Simulación N° 10

Longitud del dren aguas arriba: 15 m Escala: 1:1,000

**PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA**



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

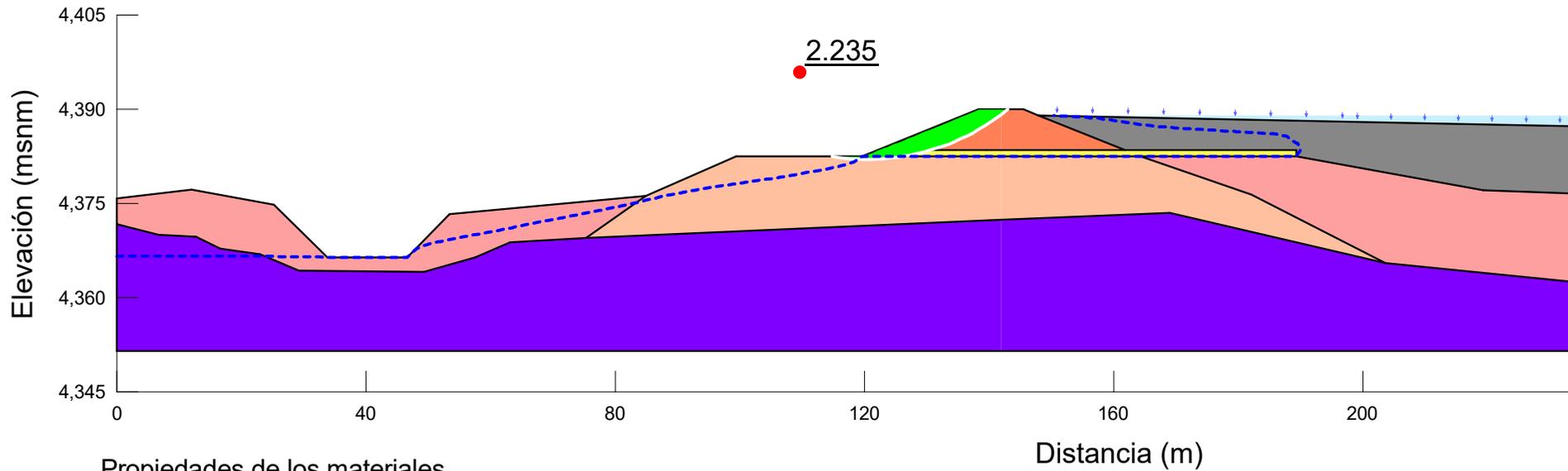
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m Simulación N° 11

Longitud del dren aguas arriba: 20 m Escala: 1:1,000

**PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA**



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

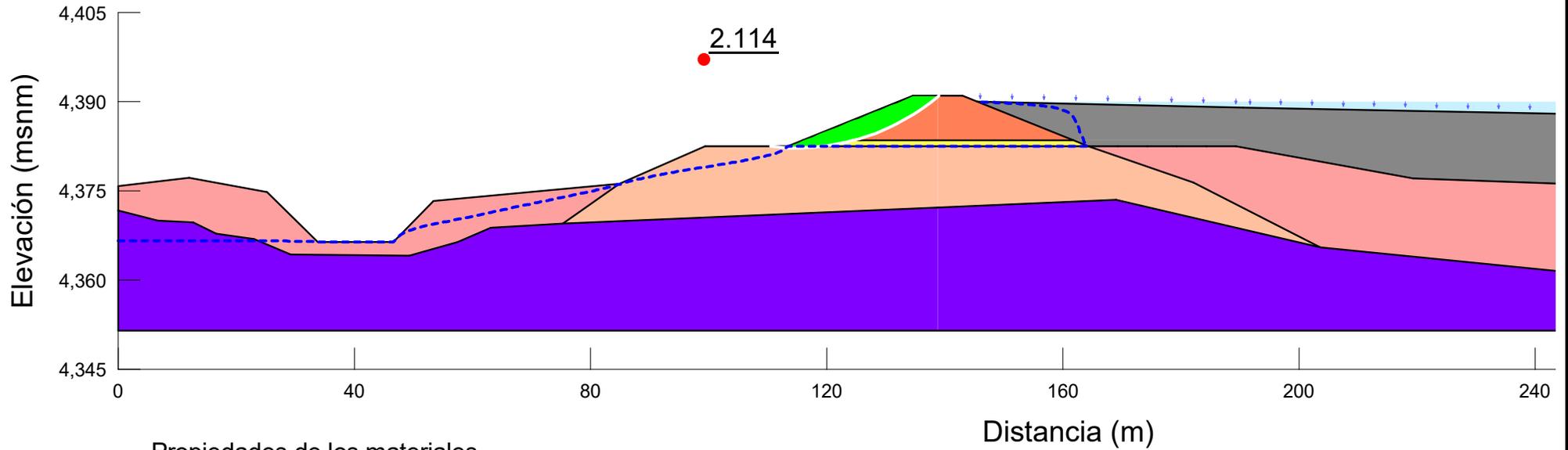
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m Simulación N° 12

Longitud del dren aguas arriba: 25 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

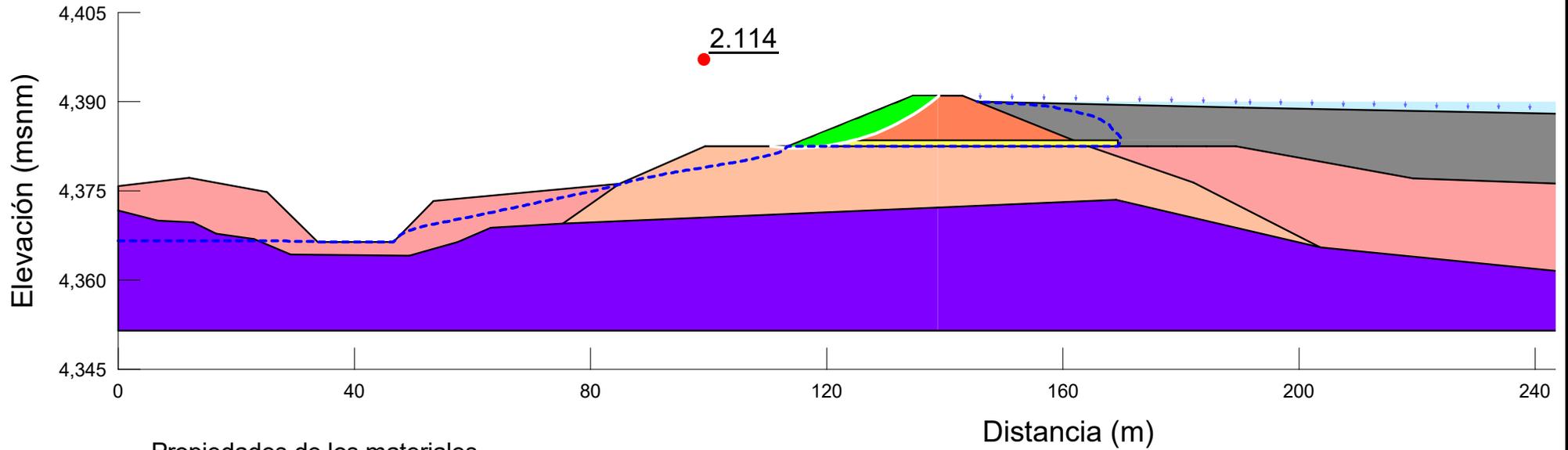
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 13

Longitud del filtro aguas arriba: 0 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

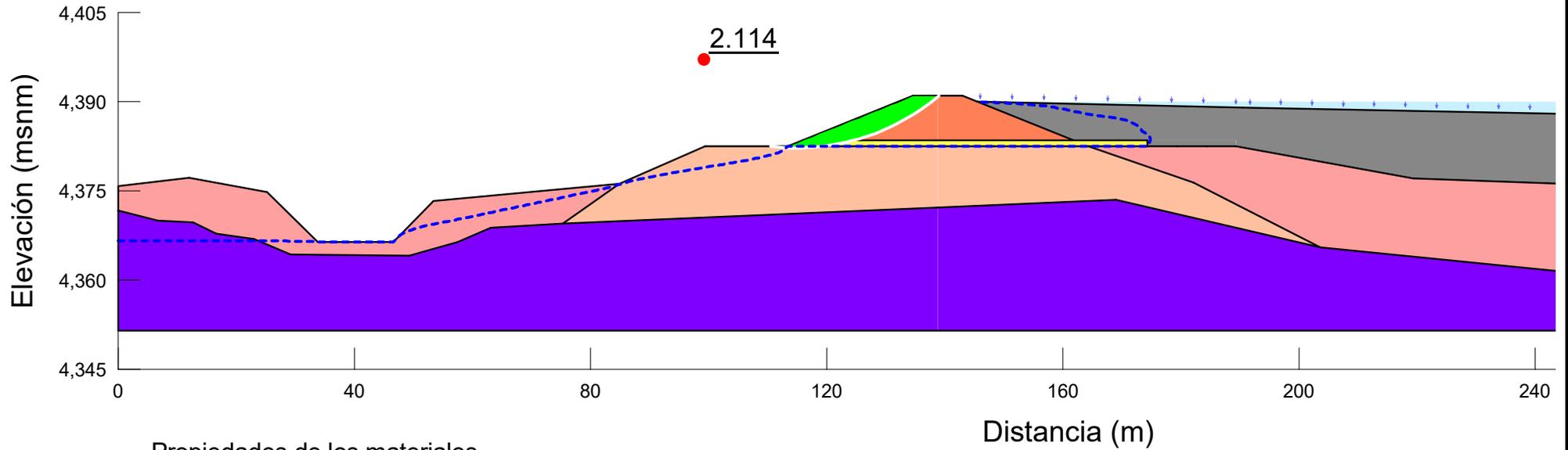
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 14

Longitud del filtro aguas arriba: 5 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

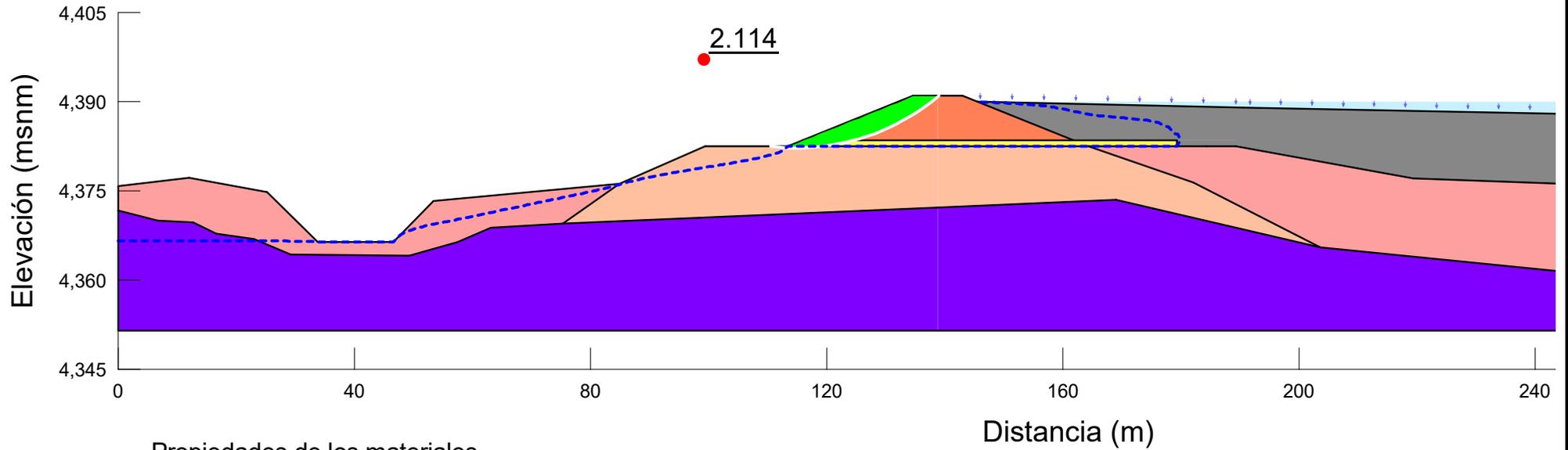
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 15

Longitud del filtro aguas arriba: 10 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

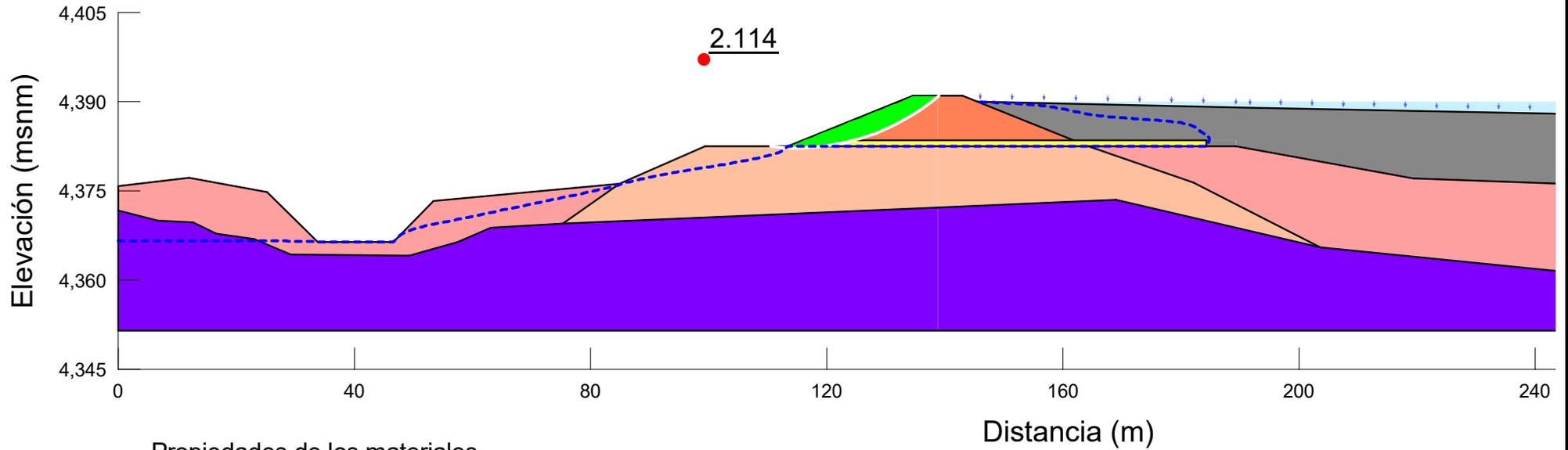
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 16

Longitud del filtro aguas arriba: 15 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

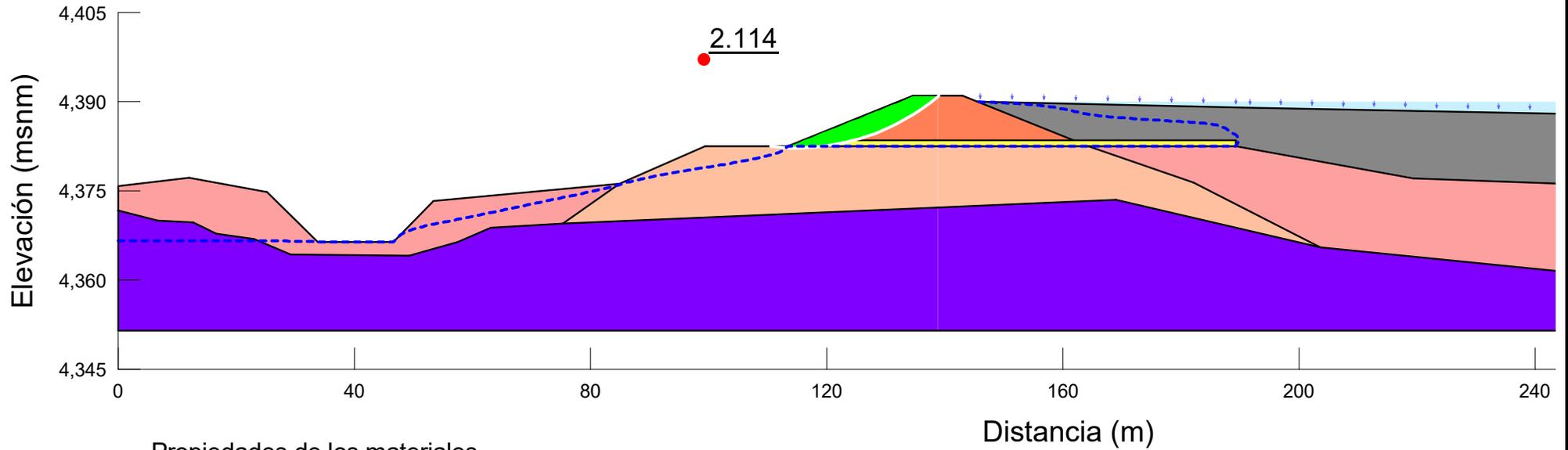
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 17

Longitud del filtro aguas arriba: 20 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

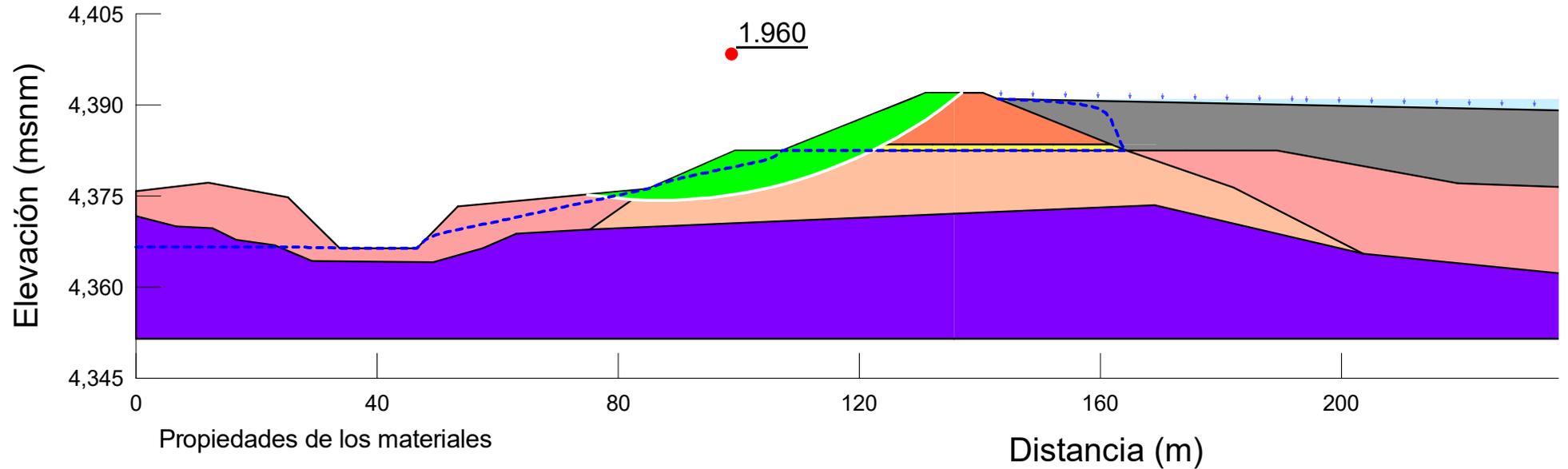
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 18

Longitud del filtro aguas arriba: 25 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

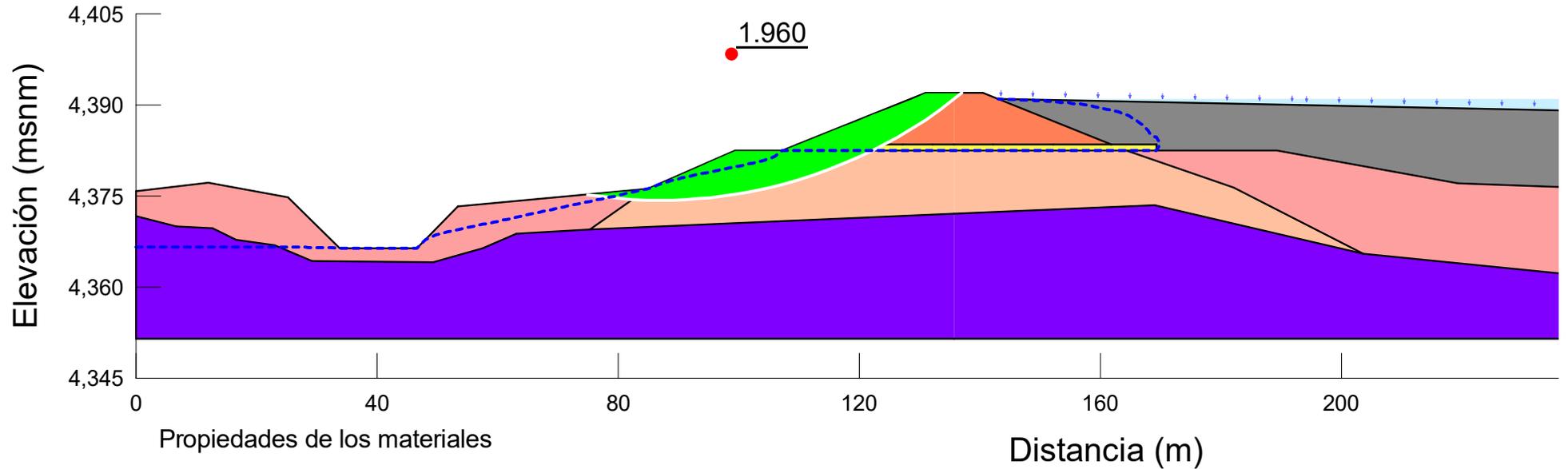
Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 19

Longitud del filtro aguas arriba: 0 m

Escala: 1:1,000

**PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA**



Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

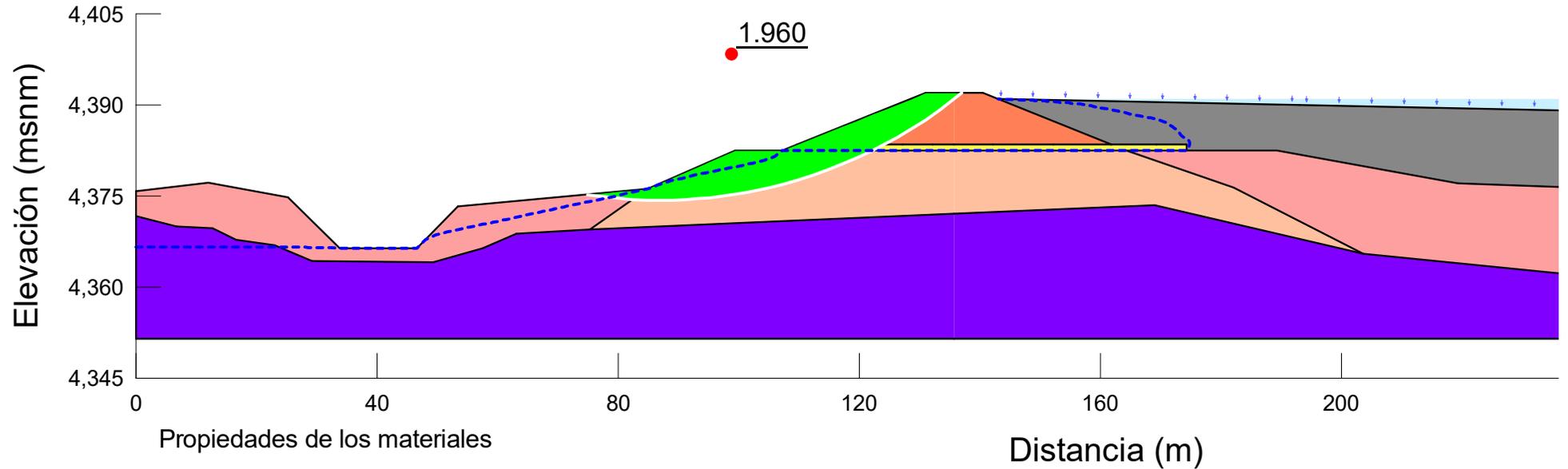
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m Simulación N° 20

Longitud del filtro aguas arriba: 5 m Escala: 1:1,000

**PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA**



Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

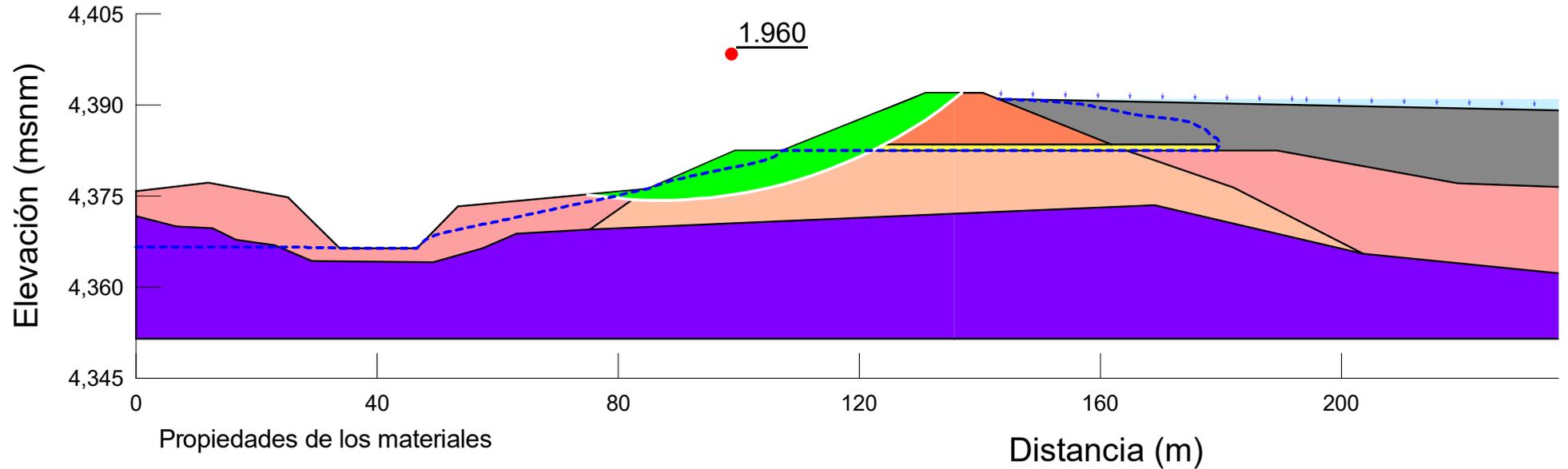
Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 21

Longitud del filtro aguas arriba: 10 m

Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

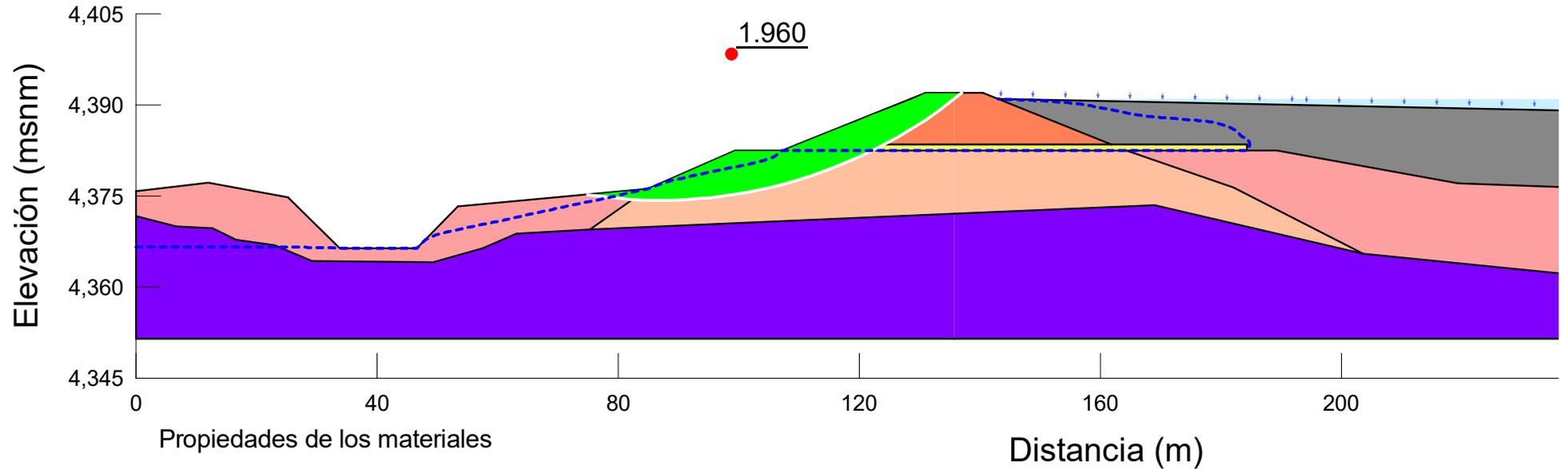
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m Simulación N° 22

Longitud del filtro aguas arriba: 15 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

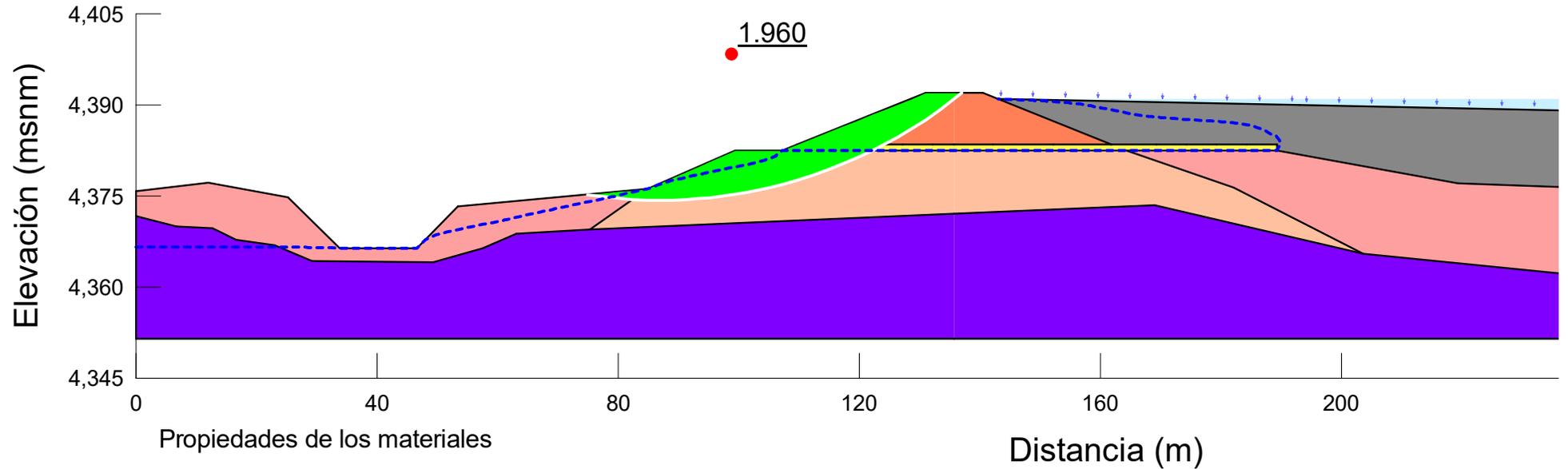
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m Simulación N° 23

Longitud del filtro aguas arriba: 20 m Escala: 1:1,000

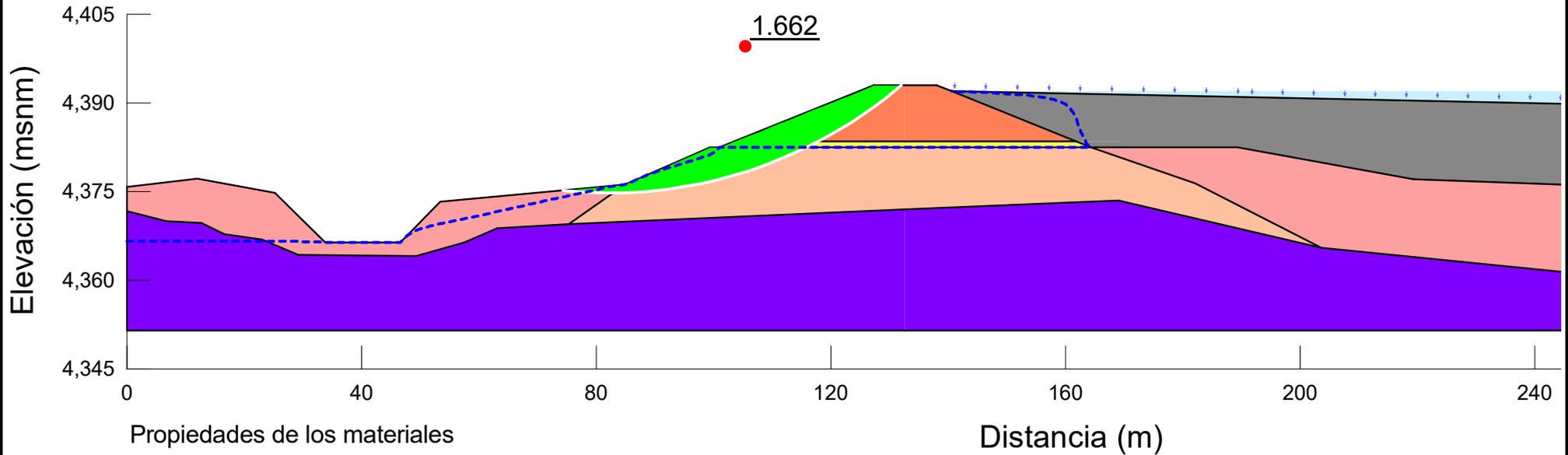
**PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA**



Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL</p>
<p>Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"</p>
<p>Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461</p>
<p>Modelamiento con sistema de filtro</p>
<p>Altura de la presa: 9.5 m Simulación N° 24</p>
<p>Longitud del filtro aguas arriba: 25 m Escala: 1:1,000</p>

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

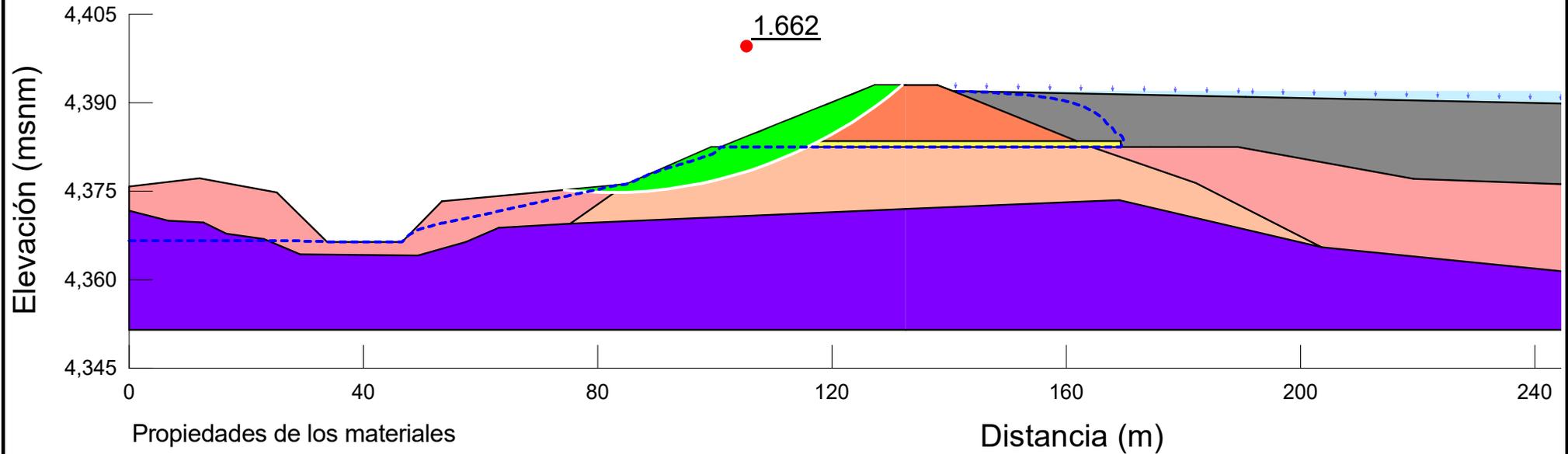
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m Simulación N° 25

Longitud del filtro aguas arriba: 0 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

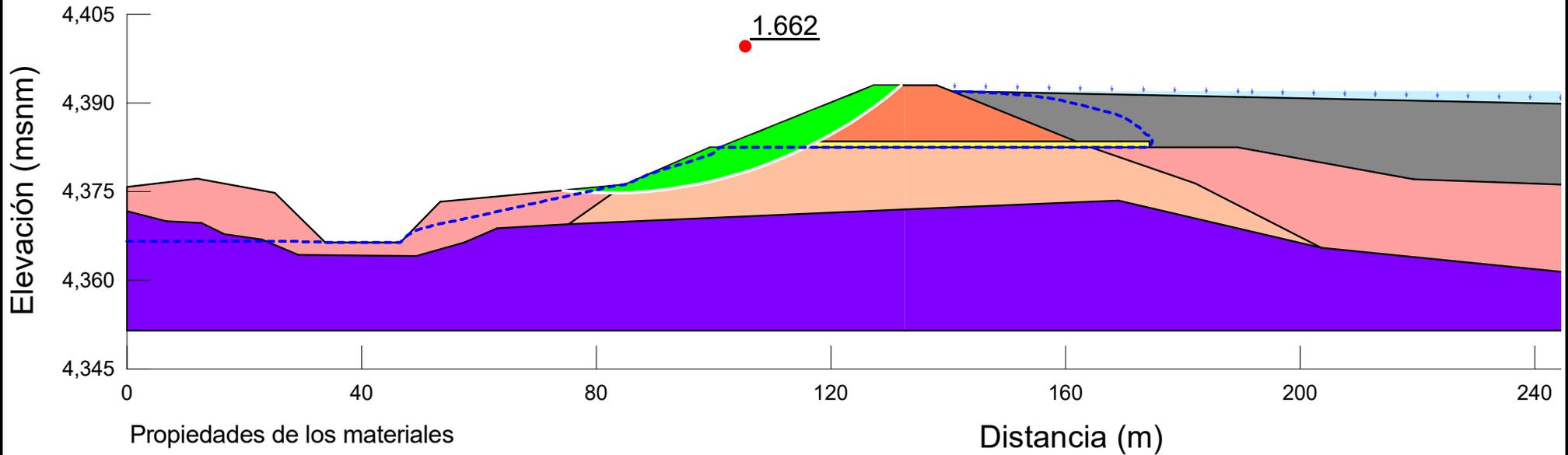
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m Simulación N° 26

Longitud del filtro aguas arriba: 5 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

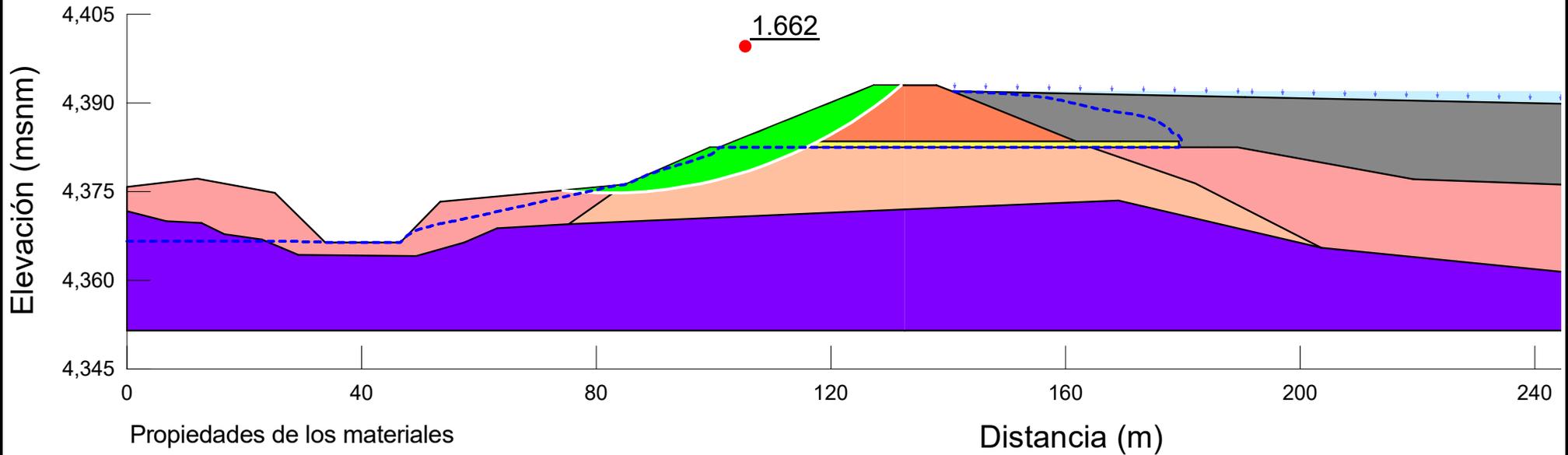
Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m Simulación N° 27

Longitud del filtro aguas arriba: 10 m Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA

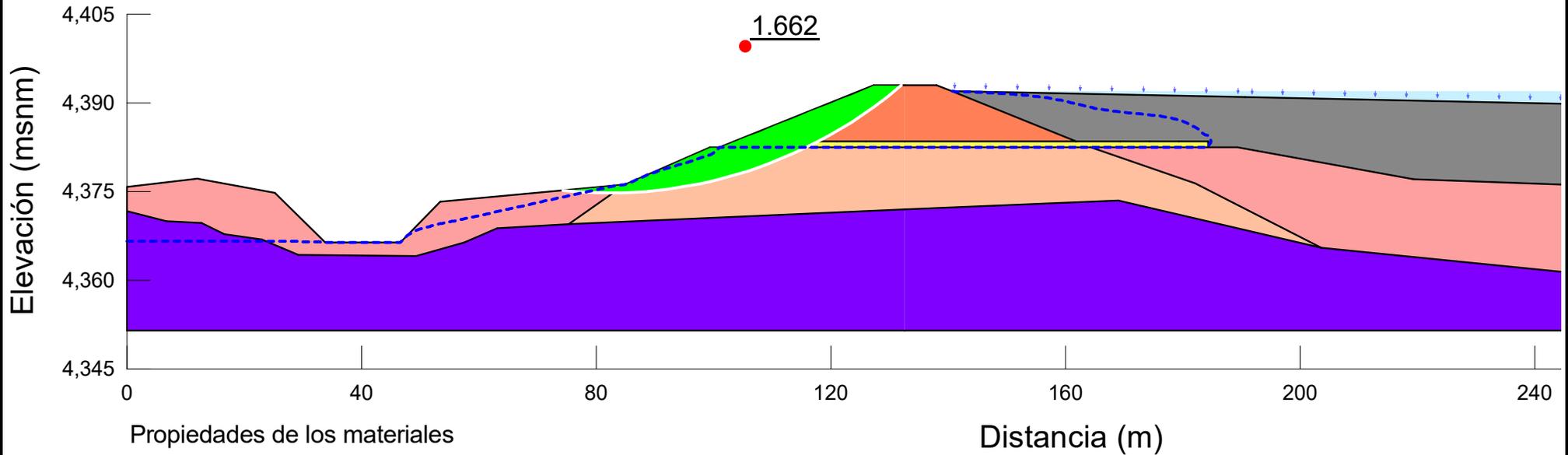


Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL</p>
<p>Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"</p>
<p>Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461</p>
<p>Modelamiento con sistema de filtro</p>
<p>Altura de la presa: 10.5 m Simulación N° 28</p>
<p>Longitud del filtro aguas arriba: 15 m Escala: 1:1,000</p>

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

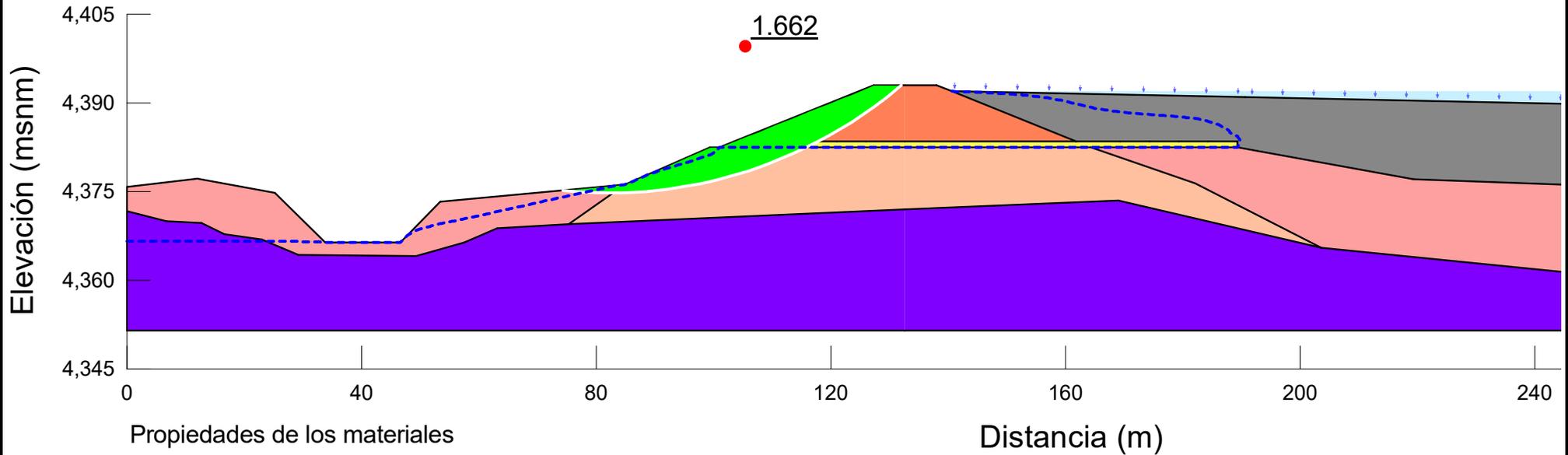
Tesista: Clede Salinas Antezana
Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m
Simulación N° 29

Longitud del filtro aguas arriba: 20 m
Escala: 1:1,000

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LA OPERACIÓN
CONDICIÓN ESTÁTICA



Propiedades de los materiales

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	Basamento Rocoso	26	6,000	42
■	Depósito Fluvio Glaciar Denso	23	0	34
■	Depósito Fluvio Glaciar Medio	21.6	0	33
■	Filtro de drenaje	21.6	0	37
■	Material de la presa existente	21.3	0	36
■	Relave	20	0	30



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m Simulación N° 30

Longitud del filtro aguas arriba: 25 m Escala: 1:1,000

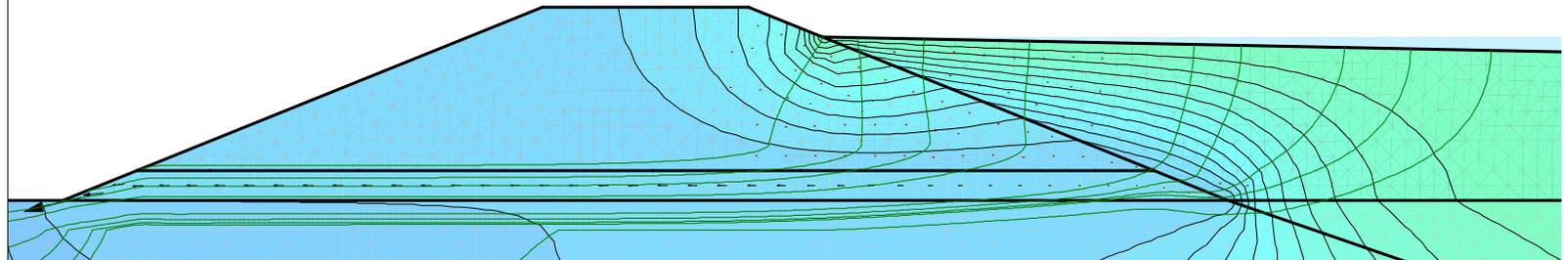
ANEXO 3

Redes de flujo de las 30 simulaciones

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga hidráulica

- $\leq 4,381 - 4,381.5$ m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°1

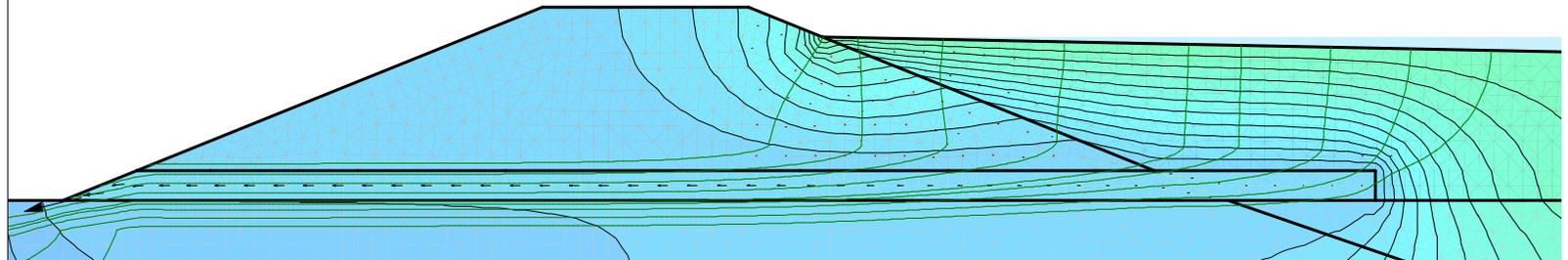
Longitud del dren horizontal: 0 m

Escala: 1:250

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- $\leq 4,381 - 4,381.5$ m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°2

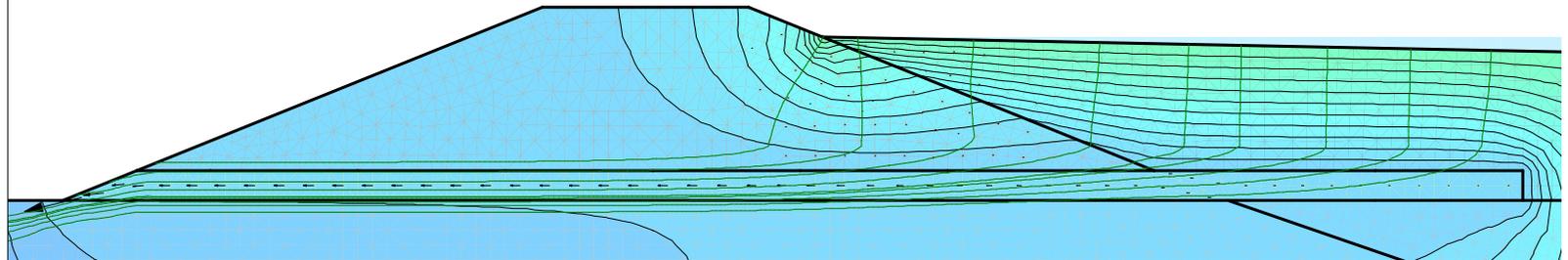
Longitud del dren horizontal: 5 m

Escala: 1:250

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- $\leq 4,381 - 4,381.5$ m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°3

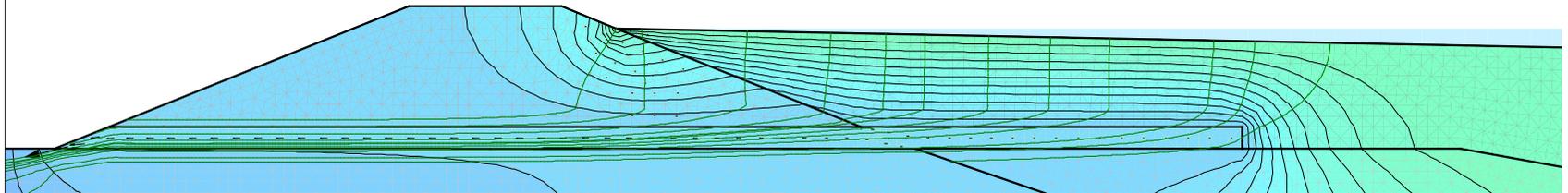
Longitud del dren horizontal: 10 m

Escala: 1:250

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,381 - 4,381.5 m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°4

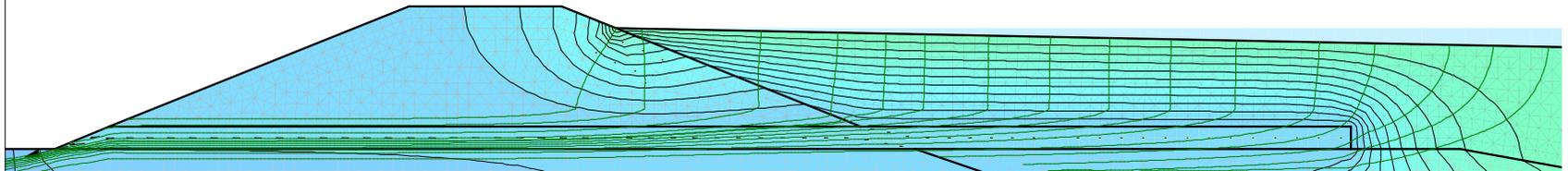
Longitud del dren horizontal: 15 m

Escala: 1:320

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,381 - 4,381.5 m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°5

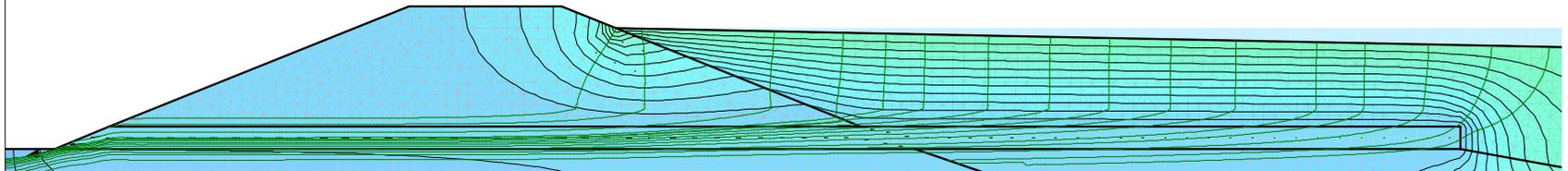
Longitud del dren horizontal: 20 m

Escala: 1:320

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,381 - 4,381.5 m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 6.5 m

Simulación N°6

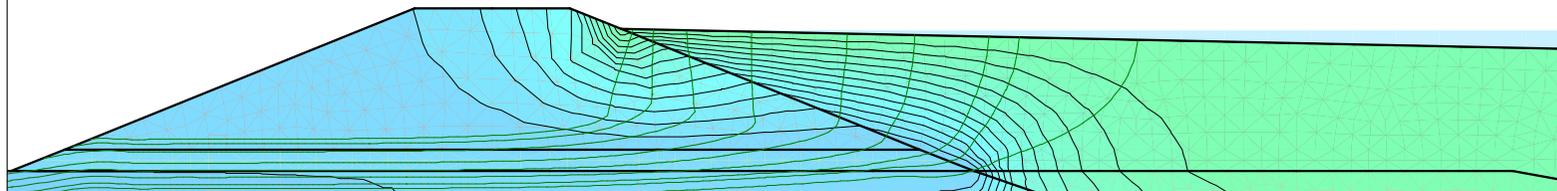
Longitud del dren horizontal: 25 m

Escala: 1:320

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,381 - 4,381.5 m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m
- 4,388 - 4,388.5 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 7

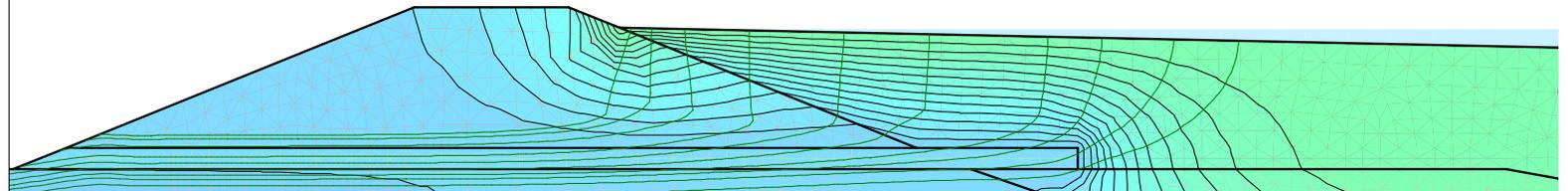
Longitud del dren aguas arriba: 0 m

Escala: 1:350

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,381 - 4,381.5 m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m
- 4,388 - 4,388.5 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 8

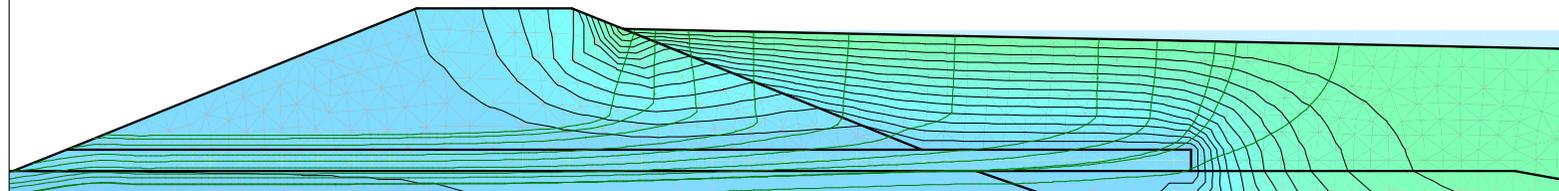
Longitud del dren aguas arriba: 5 m

Escala: 1:350

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,381 - 4,381.5 m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m
- 4,388 - 4,388.5 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 9

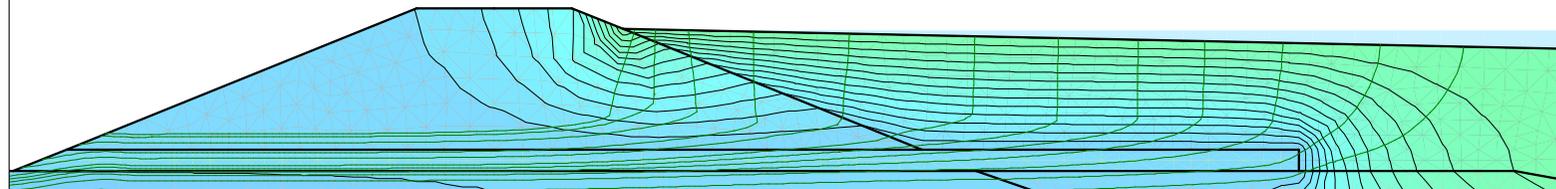
Longitud del dren aguas arriba: 10 m

Escala: 1:350

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,381 - 4,381.5 m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m
- 4,388 - 4,388.5 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 10

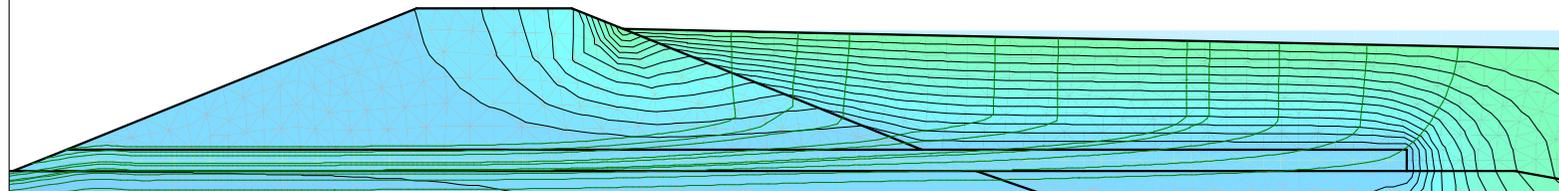
Longitud del dren aguas arriba: 15 m

Escala: 1:350

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,381 - 4,381.5 m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m
- 4,388 - 4,388.5 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 11

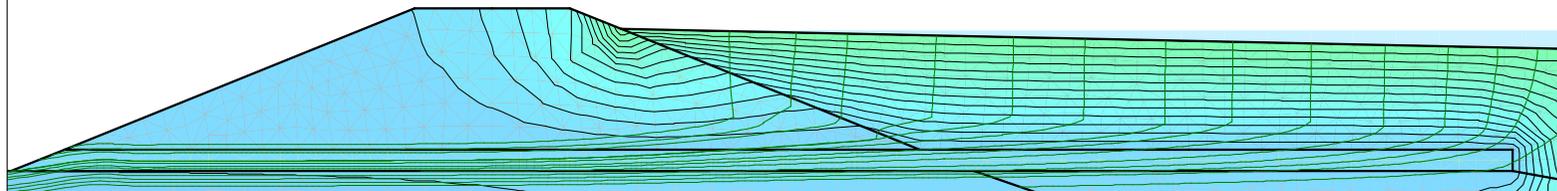
Longitud del dren aguas arriba: 20 m

Escala: 1:350

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,381 - 4,381.5 m
- 4,381.5 - 4,382 m
- 4,382 - 4,382.5 m
- 4,382.5 - 4,383 m
- 4,383 - 4,383.5 m
- 4,383.5 - 4,384 m
- 4,384 - 4,384.5 m
- 4,384.5 - 4,385 m
- 4,385 - 4,385.5 m
- 4,385.5 - 4,386 m
- 4,386 - 4,386.5 m
- 4,386.5 - 4,387 m
- 4,387 - 4,387.5 m
- 4,387.5 - 4,388 m
- 4,388 - 4,388.5 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 7.5 m

Simulación N° 12

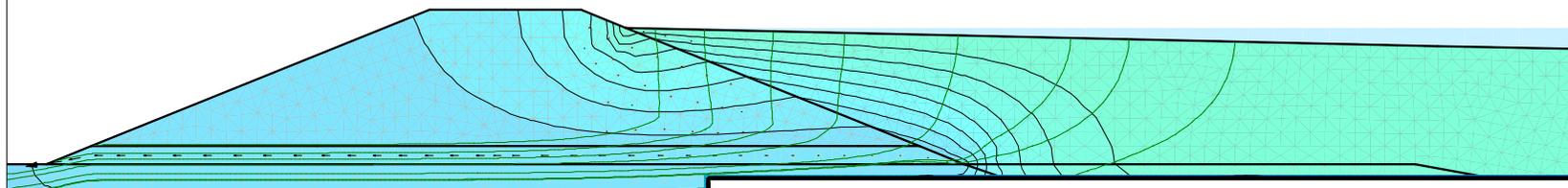
Longitud del dren aguas arriba: 25 m

Escala: 1:350

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m

Simulación N° 13

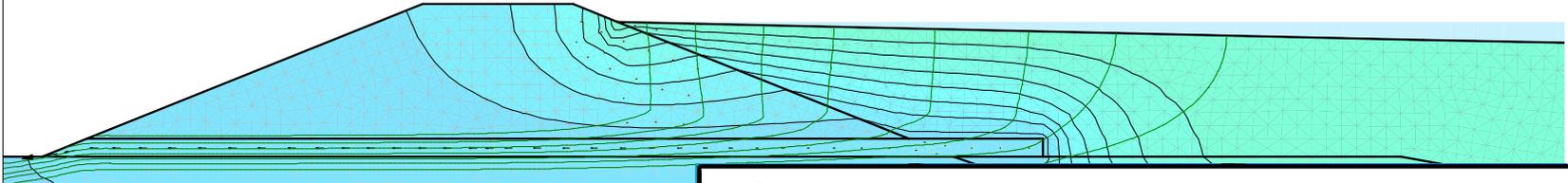
Longitud del filtro aguas arriba: 0 m

Escala: 1:400

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.20094146I

Modelamiento con sistema de filtro

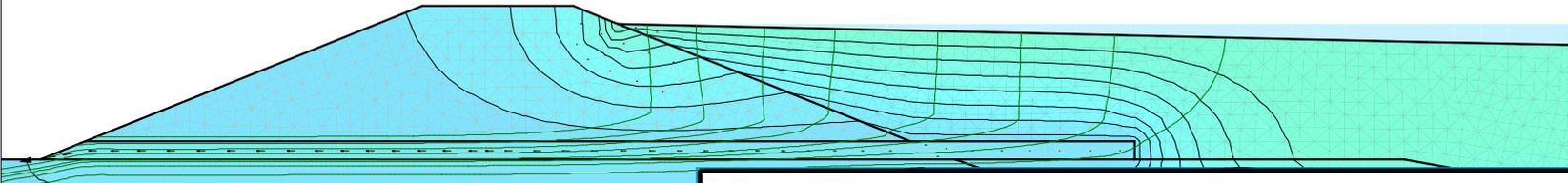
Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 14

Longitud del filtro aguas arriba: 5 m Escala: 1:400

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461
Modelamiento con sistema de filtro

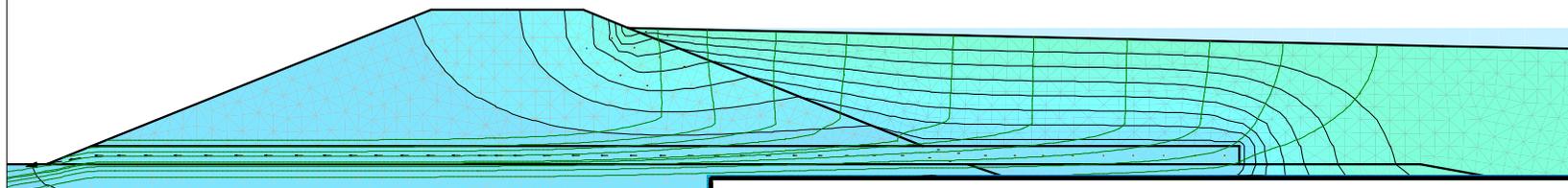
Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 15

Longitud del filtro aguas arriba: 10 m Escala: 1:400

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.20094146I
Modelamiento con sistema de filtro

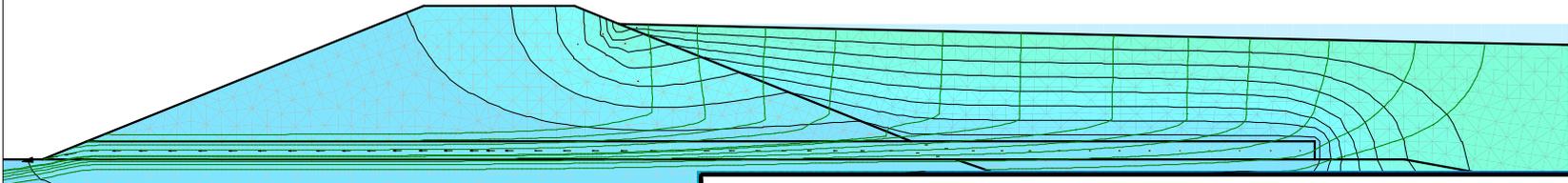
Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 16

Longitud del filtro aguas arriba: 15 m Escala: 1:400

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.20094146I
Modelamiento con sistema de filtro

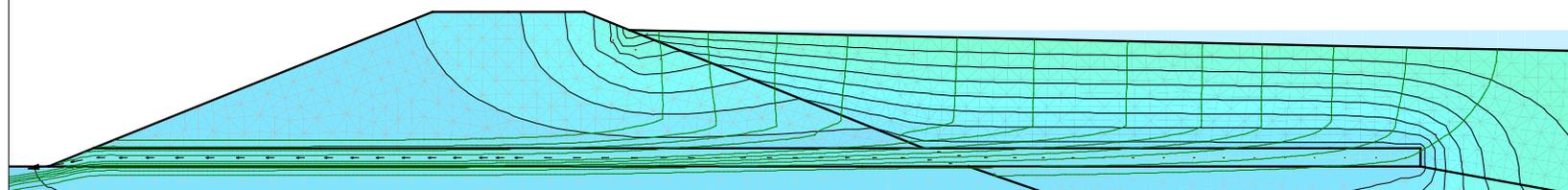
Altura de la presa: 8.5 m Simulación N° 17

Longitud del filtro aguas arriba: 20 m Escala: 1:400

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- $\leq 4,378 - 4,379$ m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 8.5 m

Simulación N° 18

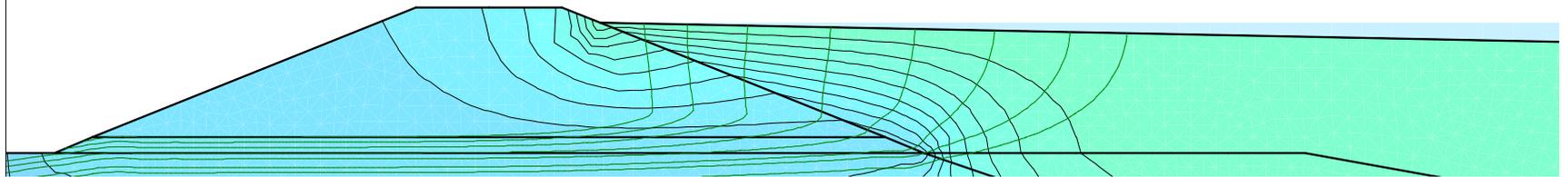
Longitud del filtro aguas arriba: 25 m

Escala: 1:400

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m
- 4,390 - 4,391 m
- 4,391 - 4,392 m
-
-



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 19

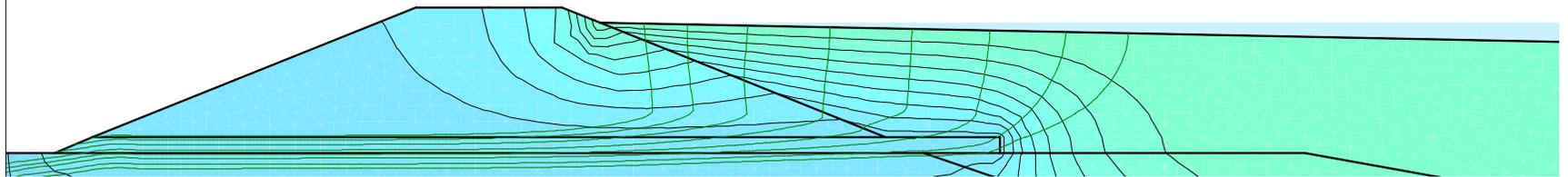
Longitud del filtro aguas arriba: 0 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- $\leq 4,378 - 4,379$ m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m
- 4,390 - 4,391 m
- 4,391 - 4,392 m
-
-



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 20

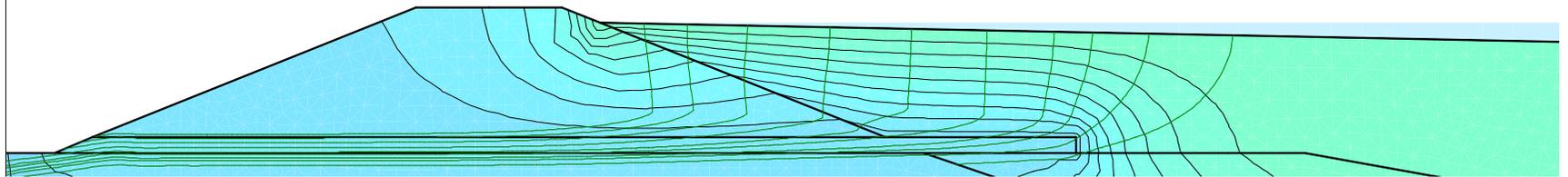
Longitud del filtro aguas arriba: 5 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m
- 4,390 - 4,391 m
- 4,391 - 4,392 m
-
-



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
 UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 21

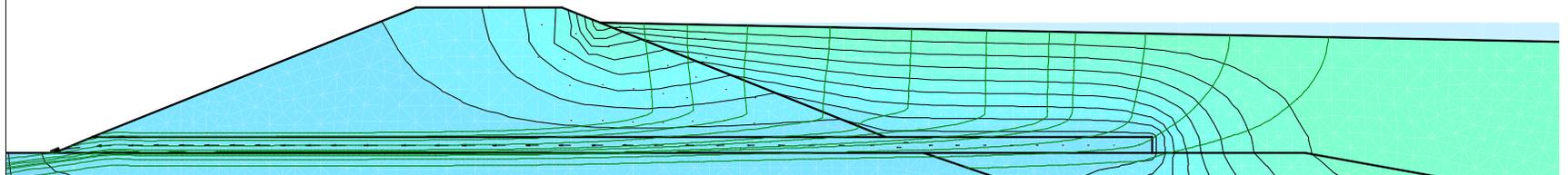
Longitud del filtro aguas arriba: 10 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m
- 4,390 - 4,391 m
- 4,391 - 4,392 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 22

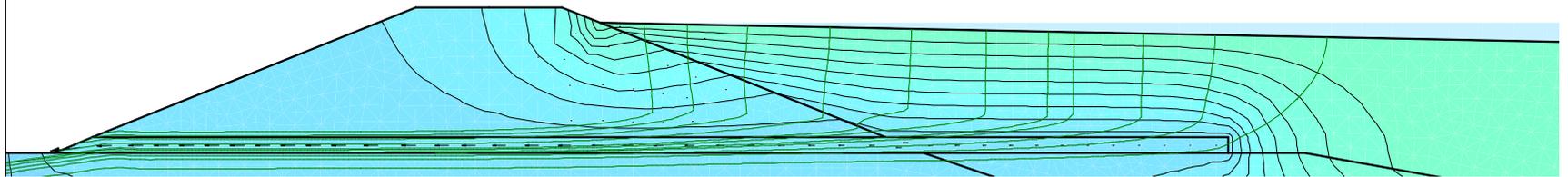
Longitud del filtro aguas arriba: 15 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m
- 4,390 - 4,391 m
- 4,391 - 4,392 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
 UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 23

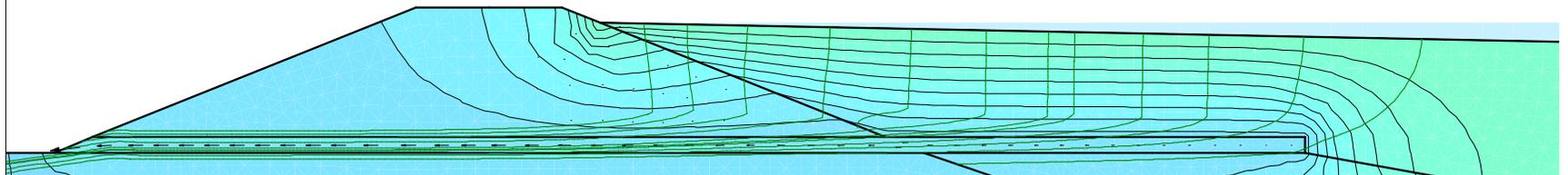
Longitud del filtro aguas arriba: 20 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,378 - 4,379 m
- 4,379 - 4,380 m
- 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m
- 4,390 - 4,391 m
- 4,391 - 4,392 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
 UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento con sistema de filtro

Altura de la presa: 9.5 m

Simulación N° 24

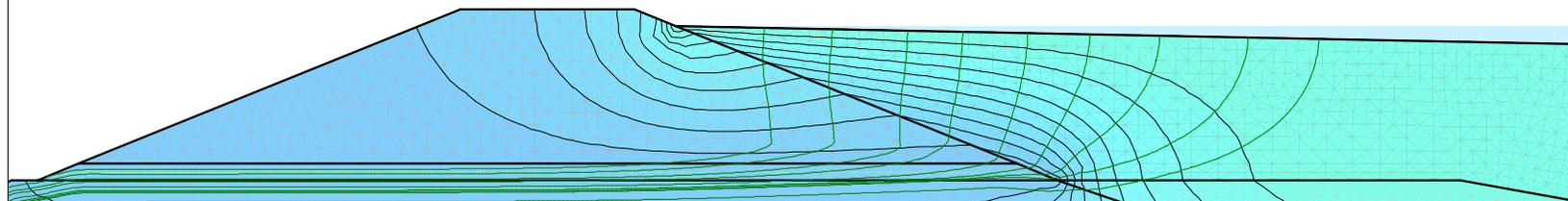
Longitud del filtro aguas arriba: 25 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m
- 4,390 - 4,391 m
- 4,391 - 4,392 m
- 4,392 - 4,393 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento sin sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 25

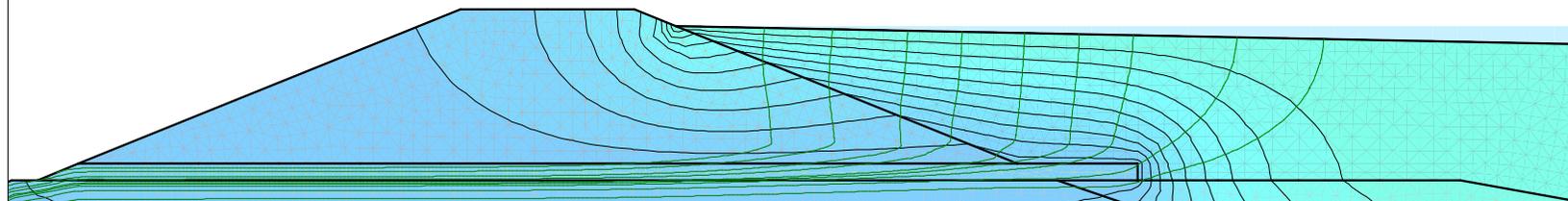
Longitud del filtro aguas arriba: 0 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m
- 4,390 - 4,391 m
- 4,391 - 4,392 m
- 4,392 - 4,393 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento sin sistema de filtro

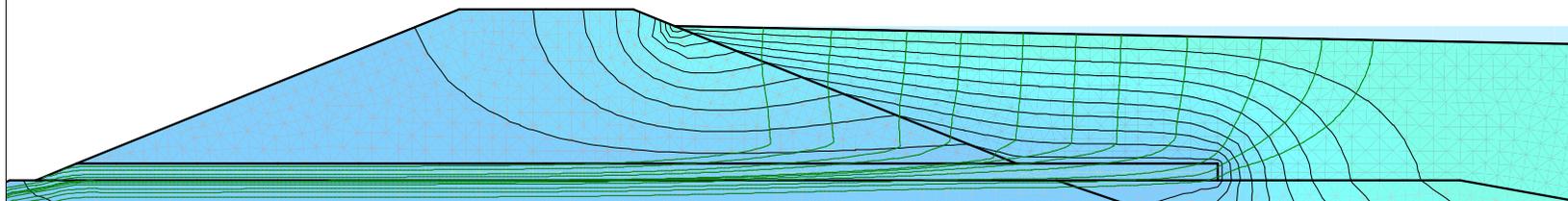
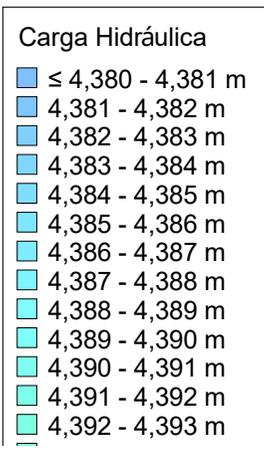
Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 26

Longitud del filtro aguas arriba: 5 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana Cod.200941461

Modelamiento sin sistema de filtro

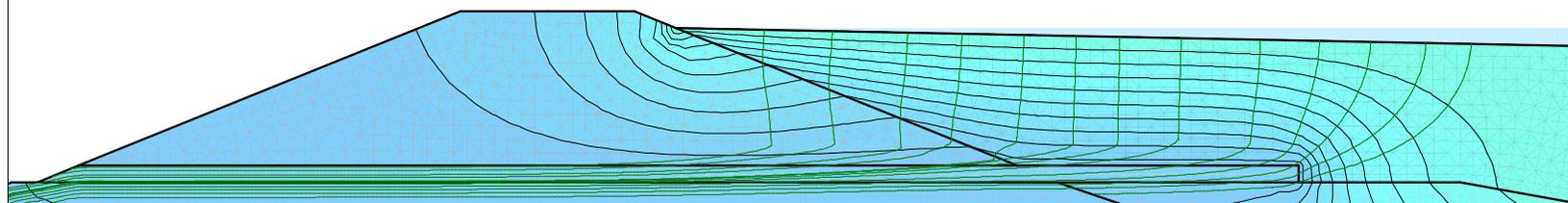
Altura de la presa: 10.5 m Simulación N° 27

Longitud del filtro aguas arriba: 10 m Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

- ≤ 4,380 - 4,381 m
- 4,381 - 4,382 m
- 4,382 - 4,383 m
- 4,383 - 4,384 m
- 4,384 - 4,385 m
- 4,385 - 4,386 m
- 4,386 - 4,387 m
- 4,387 - 4,388 m
- 4,388 - 4,389 m
- 4,389 - 4,390 m
- 4,390 - 4,391 m
- 4,391 - 4,392 m
- 4,392 - 4,393 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
 UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.200941461

Modelamiento sin sistema de filtro

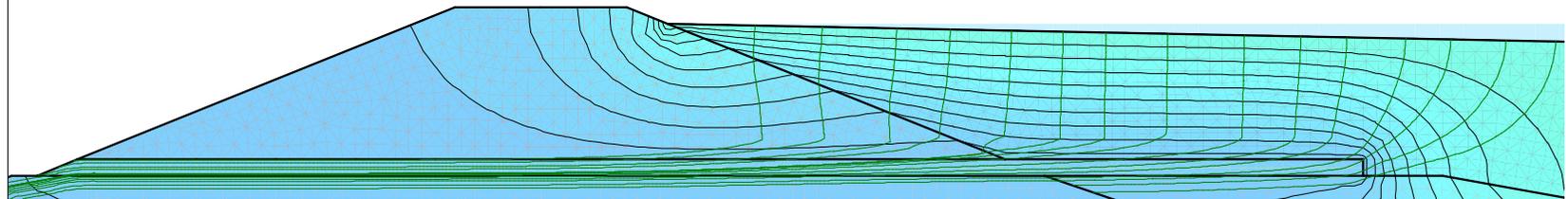
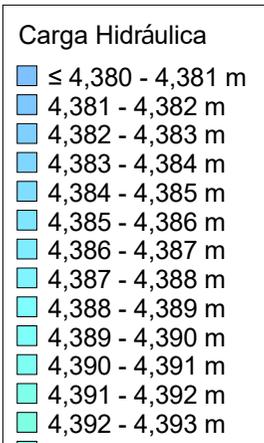
Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 28

Longitud del filtro aguas arriba: 15 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento sin sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 29

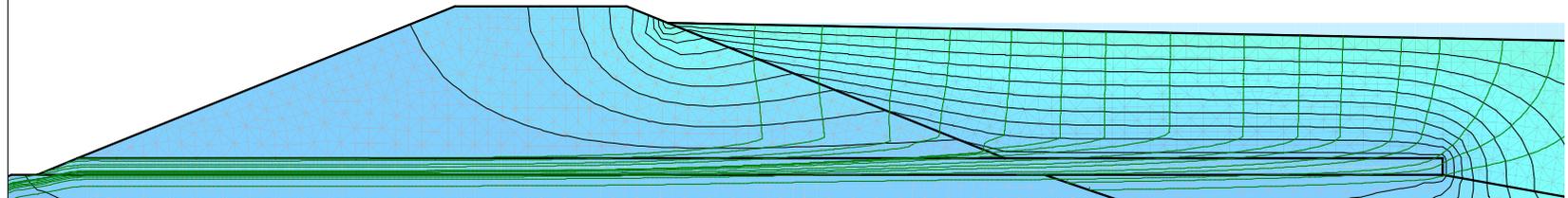
Longitud del filtro aguas arriba: 20 m

Escala: 1:450

PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN FLUJO PERMANENTE
 REDES DE FLUJO

Carga Hidráulica

■	≤ 4,380 - 4,381 m
■	4,381 - 4,382 m
■	4,382 - 4,383 m
■	4,383 - 4,384 m
■	4,384 - 4,385 m
■	4,385 - 4,386 m
■	4,386 - 4,387 m
■	4,387 - 4,388 m
■	4,388 - 4,389 m
■	4,389 - 4,390 m
■	4,390 - 4,391 m
■	4,391 - 4,392 m
■	4,392 - 4,393 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis: "EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE
 UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES
 UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRO EXTENDIDO"

Tesista: Clede Salinas Antezana

Cod.20094146I

Modelamiento sin sistema de filtro

Altura de la presa: 10.5 m

Simulación N° 30

Longitud del filtro aguas arriba: 25 m

Escala: 1:450