ÁGORA SOL
A HOLGADO Consultor

# S.C.M ATACAMA KOZAN

## PROYECTO: CONTINUIDAD OPERACIONAL FAENA MINERA ATACAMA KOZAN

**N° 5009-GE-INF-06_B**

# ANALISIS DE ESTABILIDAD ESTÁTICO Y SEUDOESTÁTICO

Preparado por

## Ágora Soluciones SPA

Aprobado por

Jefe de Disciplina — Rolando Moraga R.
Jefe de Ingeniería — Agustín Holgado

| Rev. | Por | Emitido para | Fecha | Fecha de Revisión | Aprobado |
|---|---|---|---|---|---|
| A | RMR | Revisión Interna | 07-12-2017 | | |
| B | RMR | Revisión Jefe de Ingeniería | 15-12-2017 | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Comentarios: | | | | | |

# PROYECTO: CONTINUIDAD OPERACIONAL FAENA MINERA ATACAMA KOZAN

# ANALISIS DE ESTABILIDAD ESTÁTICO Y SEUDOESTÁTICO

## ÍNDICE

**1 INTRODUCCIÓN ..... 4**
**2 OBJETIVO Y ALCANCE ..... 5**
**3 REFERENCIAS ..... 8**
**4 DESCRIPCION GENERAL DEL DEPÓSITO ..... 9**
**5 CARACTERIZACION GEOTECNICA DE LOS MATERIALES ..... 12**
5.1 SUELO DE FUNDACION ..... 12
5.2 RELAVES ..... 14
**6 ANALISIS DE ESTABILIDAD ..... 17**
6.1 METODOLOGIA ..... 17
6.2 PERFIL DE ESTUDIO ..... 18
6.3 ACELERACION MAXIMA Y COEFICIENTE SISMICO ..... 19
6.4 NIVEL PIEZOMETRICO ..... 20
6.5 ESCENARIO DE CÁLCULO ..... 21
6.6 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD ..... 21
6.7 RESULTADOS ..... 22
**7 CONCLUSIONES ..... 24**

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 - 1: Trazado en Planta Perfil de Estudio ..... 5
Figura 1 - 2: Perfil de Estudio Corte A-A ..... 6
Figura 1 - 3: Perfil de Estudio- Etapa N°1 ..... 10
Figura 1 - 4: Perfil de Estudio- Etapa N°1 ..... 10
Figura 1 - 5: Perfil de Estudio- Etapa N°1 ..... 11
Figura 1 - 6: Geología de la Área Emplazamiento del Proyecto, Carta Copiapó ..... 12
**Figura 1 - 7:** Mapeo Geológico Quebrada El Gato ..... 13
**Figura 1 - 8:** Perfil de Estudio Con Niveles Piezométricos ..... 16
Figura 1 - 9: Perfil de Estudio para Análisis de Estabilidad de Taludes ..... 17
**Figura 1 - 10:** Perfil de Estudio para Análisis de Sensibilidad - DRF ..... 23

**Figura 1 - 11:** Perfil de Estudio para Análisis de Sensibilidad – Muro de Arenas.....23

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 - 1: Parámetros Resistentes del Suelo de Fundación y Material de Empréstito (REF.5).....13

Tabla 1 - 2: Parámetros Resistentes del Relave (REF.3).....14

Tabla 1 - 3: Principales Escenarios Sísmicos Región de Atacama.....19

Tabla 1 - 4: Resumen de Resultados Análisis de Estabilidad.....22

## ANEXOS

ANEXO A FIGURAS POTENCIALES SUPERFICIES DE FALLA

ANEXO B INFORMES DE ENSAYOS LABORATORIO DE ENSAYOS DE MECANICA DE SUELOS ONE GEOTECNIA S.p.A (INFORME N°4613-0-17)

# 1 INTRODUCCIÓN

Para la tramitación de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del proyecto “Continuidad Operacional de Faena Minera Atacama Kozan”, se ha desarrollado el presente informe técnico con los análisis de estabilidad de los taludes para el depósito de relaves filtrados y relave convencional.

El Depósito de relaves filtrados proyectado tiene la particularidad que se emplaza junto al Tranque El Gato, aguas abajo de él y comparten la interferencia con la quebrada El Gato.

El presente informe realiza la evaluación de la estabilidad de taludes global estática y seudoestatica (sísmica) del depósito de relaves convencional y el depósito de relaves filtrado que se apoya sobre el muro de arenas del depósito convencional. Los análisis realizados consideran distintas etapas de crecimiento del depósito de relaves filtrados, correspondientes principalmente a las cotas de coronamiento de cada una de estas etapas. Se presenta a continuación las etapas, con sus correspondientes cotas en msnm:

- Etapa N°1: 518 msnm
- Etapa N°2: 538 msnm
- Etapa N°3: 578 msnm

Este informe se dearrollan los ensayos de laboratorio correspondientes para caracterizar geotécnicamente las lamas depositadas aguas arriba del depósito convencional, y de esta forma analizar el fenómeno de licuefacción indicado en el DS.248.

En base a lo anteriormente expuesto, se realizaron una batería de ensayos triaxiales, drenados y no drenados que permitieron determinar las características geotécnicas de los relaves que componen el deposito. Con los resultados de estos ensayos podríamos decir que, el depósito de relaves estará compuesto por tres unidades, las cuales se describen a continuación:

1. Muro de arenas de relaves, los parámetros geotécnicos de diseño utilizados para el análisis de estabilidad consideran: densidades, cohesión y ángulo de fricción interna.
2. Cubeta de lamas de relaves, los parámetros geotécnicos de diseño utilizados para el análisis de estabilidad consideran: densidades, cohesión, ángulo de fricción interna y resistencia al corte no drenado.
3. Relaves filtrados, los parámetros geotécnicos de diseño utilizados para el análisis de estabilidad consideran: densidades, cohesión y ángulo de fricción interna.

Es importante mencionar que con el fin de tener un modelo conservador del análisis de estabilidad de taludes, se considerara niveles piezométricos al interior del muro de arenas y el depósito de relaves filtrado, aún cuando las mediciones presentadas en el informe E700 “INFORME TRIMESTRAL DE DEPÓSITOS DE RELAVES” presentado al SERNAGEOMIN, indican la inexistencia de este.

## 2 OBJETIVO Y ALCANCE

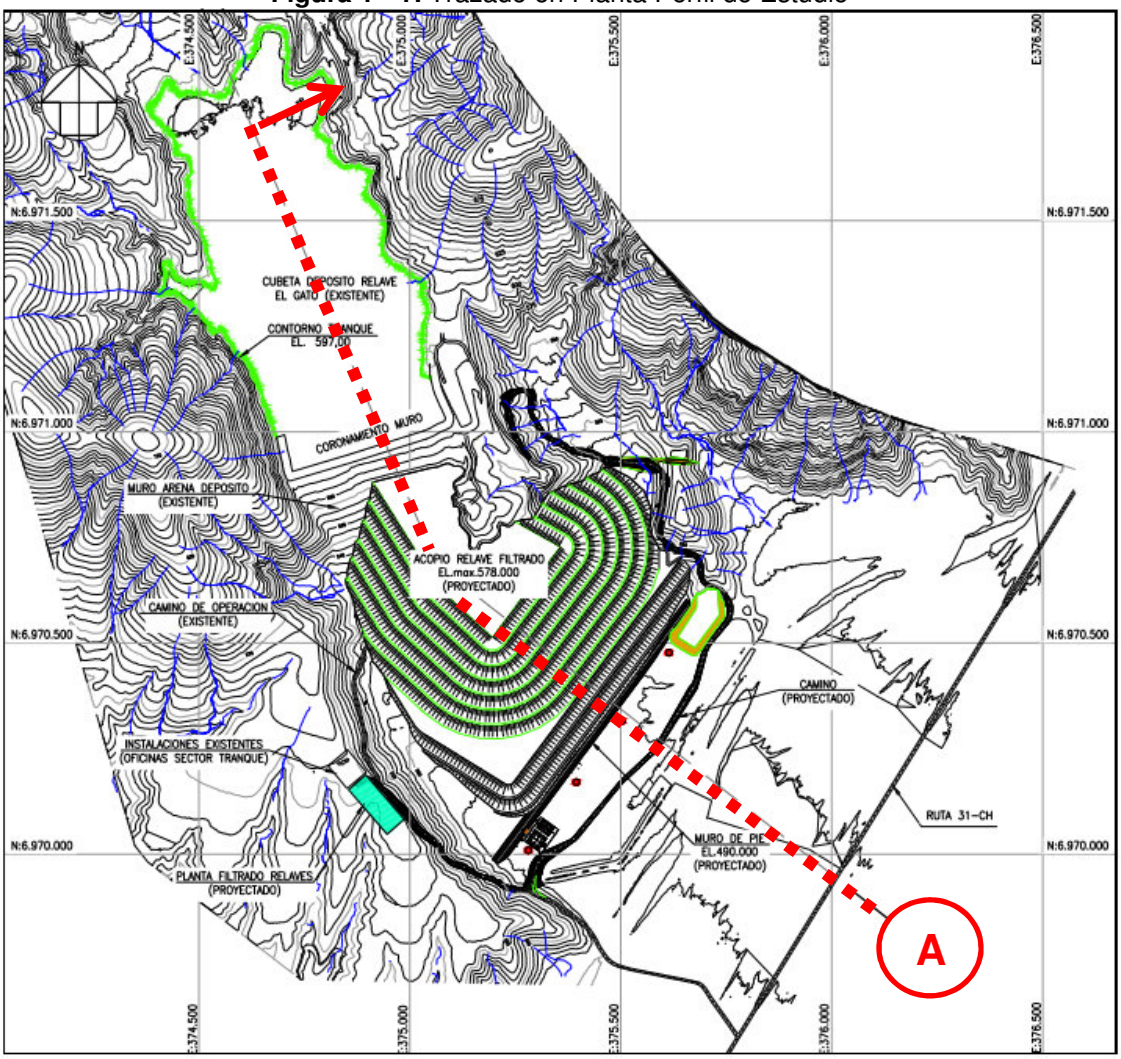
El objetivo de este informe es realizar la evaluación de la estabilidad de los taludes en dos dimensiones, mediante métodos de equilibrio límite. Para esto es necesario utilizar en el análisis el perfil más desfavorable del depósito, teniendo en consideración para su elección las siguientes variables:

- Mayor altura del depósito: determinada desde el suelo de fundación al coronamiento o último estrato de relave proyectado sobre el depósito.

- Pendiente de suelo natural: determinada por la mayor diferencia entre las cotas iniciales y finales del perfil.

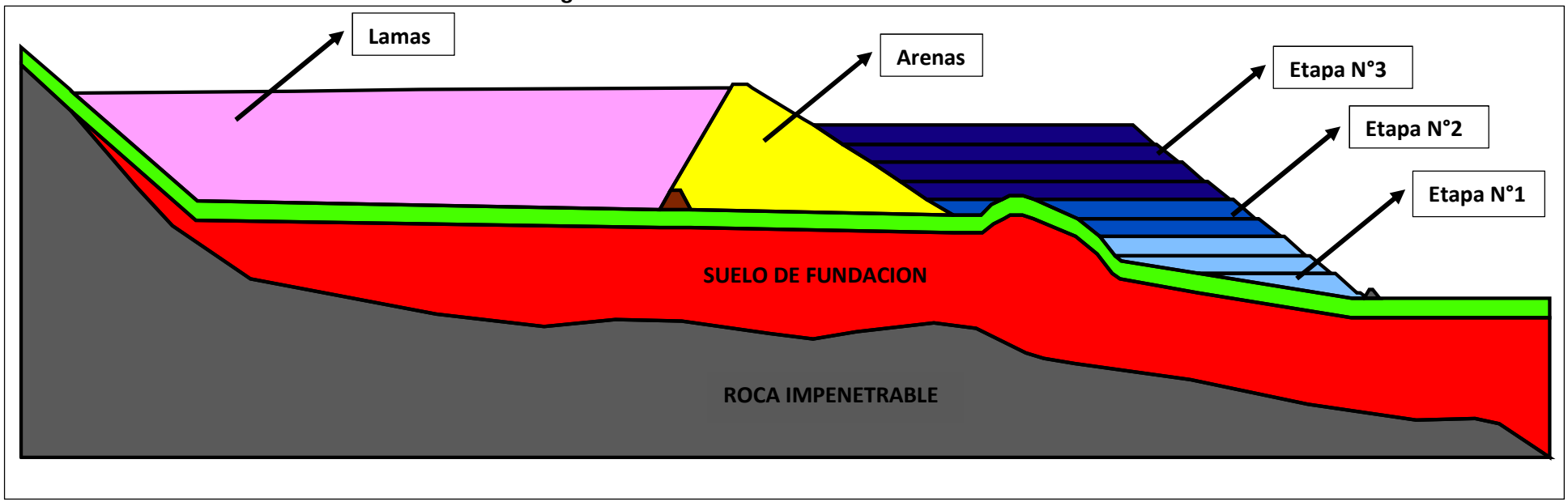
La combinación de los puntos anteriormente expuestos, entregan como resultado el perfil que se presenta a continuación:

**Figura 1 - 1:** Trazado en Planta Perfil de Estudio




**Fuente: Elaboración JO Ingeniería, "Ingeniería Conceptual Avanzada Deposito de Relave Filtrado"**

**Figura 1 - 2:** Perfil de Estudio Corte A-A




**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

Este perfil, considera que el depósito de relaves está compuesto por las siguientes unidades geotécnicas:

- Tres unidades provenientes del relave (arenas, lamas y relave filtrado)
- Tres unidades de suelo de fundación (suelo de contacto directo con el deposito, gravas de Atacama y roca impermeable)
- Muros de empréstito (material extraído desde la cubeta y la superficie donde se emplazara el relave filtrado)

Para el caso de las unidades provenientes del relave, se utilizaran los parámetros obtenidos en los últimos ensayos de laboratorio realizados (REF.3), que se encuentra en el Anexo B, del presente informe. Mientras que para el resto de las unidades geotécnicas que componen el perfil de estudio se utilizaran los mismos parámetros indicados en el estudio de referencia REF.2.

# 3 REFERENCIAS

Los antecedentes revisados para la elaboración del presente documento son los siguientes:

**Antecedentes del proyecto:**

- REF.1: RCA aprobatoria del Proyecto “Aumento de capacidad del tranque de relaves el gato de la S.C.M. Atacama Kozan". Resolución Exenta N°76, Copiapó 4 abril de 2012.

- REF.2: Memoria de Calculo Estabilidad Física del Depósito y Botadero Material de Excavaciones, elaborado por JO Ingeniería para S.C.M Atacama Kozan, año 2016.

- REF.3: Informe de Ensayos, Laboratorio de Ensayos de Mecánica de Suelos ONE GEOTECNIA S.p.A, Informe N°4613-0-17, para S.C.M Atacama Kozan, año 2017.
-
- REF.4: Informe de Riesgo Sísmico, elaborado por JO Ingeniería para S.C.M Atacama Kozan, año 2016.

- REF.5: Informe Caracterización Física de Relaves, elaborado por JO Ingeniería para S.C.M Atacama Kozan, año 2016.

- REF.6: Informe de Prospección Geotécnica, elaborado por JO Ingeniería para S.C.M Atacama Kozan, año 2016.

**Referencias SERNAGEOMIN:**

- REF.7: Ministerio de Minería (2007). “Decreto Supremo 248, “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relave”.

- REF.8: Geología de la Quebrada de Paipote, Carta Copiapó, Región de Atacama, Servicio Nacional de Geología y Minería, año 2009

**Referencias bibliográficas:**

- REF.9: Saragoni, R., (1993). “Análisis del riesgo sísmico para la reconstrucción del puerto de Valparaíso” 6º Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Sísmica, Vol II, Santiago, Chile.

- REF.10: Peters, G. (2005). “Propiedades Geotécnicas de las Arenas de Relave y sus Implicancias en el Diseño de Tranques”. V Congreso Chileno de Geotecnia, Santiago, Chile.

# 4 DESCRIPCION GENERAL DEL DEPÓSITO

El depósito de relaves actualmente operativo propiedad de S.C.M Atacama Kozan, se emplaza sobre la quebrada El Gato, en una zona muy próxima a la confluencia entre la quebrada de Paipote y El Rio Copiapó, en la comuna de Copiapó, región de Atacama.

El Tranque de Relaves El Gato se compone originalmente por un depósito de relaves tipo convencional, donde el relave proveniente de la planta de flotación ubicada en la comuna de Tierra Amarilla, es clasificado y separado en una sección gruesa (correspondiente a las arenas) depositada sobre el muro o prisma resistente y una sección fina (correspondiente a las lamas) la cual se deposita sobre la cubeta. En sus inicios este depósito contaba con un muro de partida construido con material de empréstito obtenido directamente desde la cubeta de este. Este depósito de tranque de relaves convencional es construido mediante el método aguas abajo.

Las principales características geotécnicas del depósito actual son:

- Talud exterior muro de arenas, con relación: H:V = 4,5:1
- Talud interior muro de arenas, con relación: H:V = 1,5:1
- Altura máxima del muro: 60 [m]
- Ancho de corona: 10 [m]
- Longitud del muro: 459 [m]
- Revancha: 3 [m]

Este depósito se encuentra muy próximo a cumplir su vida útil, es por esto que el año 2016 S.C.M Atacama Kozan solicitó a la empresa JO Ingeniería el desarrollo de una ingeniería conceptual avanzada para poder presentar una Declaración de Impacto Ambiental que aprobara la depositación de relaves filtrados sobre el talud del muro de arenas del actual tranque de relaves. Las observaciones realizadas por la autoridad a los estudios presentados, hacen necesario realizar nuevos ensayos de caracterización geotécnica y de esta forma evaluar la estabilidad del depósito de relaves para las condiciones de operación y cierre.

El depósito de relaves filtrados se dispone aguas abajo del actual Tranque de Relaves El Gato, por lo cual tiene una interacción directa con él. Así, el análisis de estabilidad de taludes considera la interacción de los dos depósitos (convencional y filtrado) con el suelo de fundación.

Las principales características geométricas del depósito de relaves filtrado, son las siguientes:

- Numero de bancos: 9
- Altura de bancos: 10 [m]
- Ancho de berma:5 [m]
- Ángulo local del banco: 18°
- Ángulo global del depósito: 16°

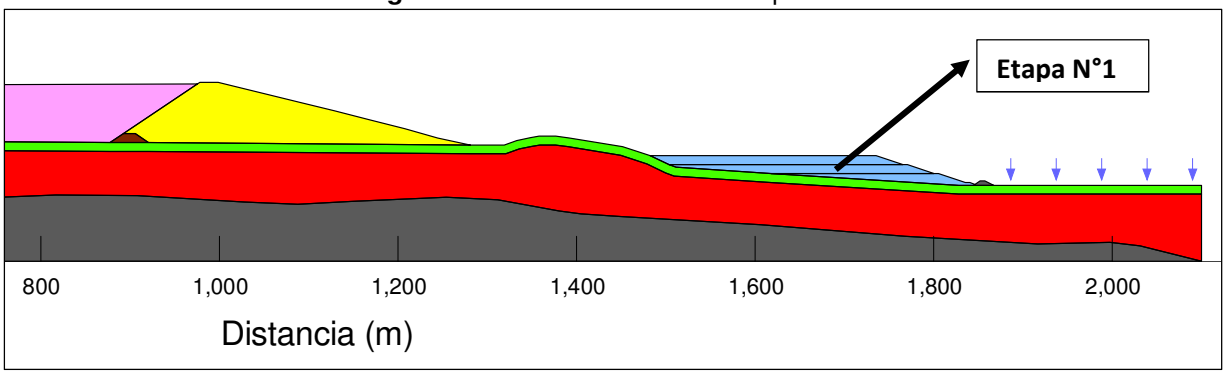
La depositación del relave filtrado se ejecutará en etapas sucesivas, de esta forma el relave depositado irá generando una densificación de los estratos inferiores, aumentando la densidad de los relaves, producto del efecto de consolidación.

Se han definido tres etapas de crecimiento del depósito para efectos de determinar su crecimiento y realizar los análisis de estabilidad de taludes correspondientes. Estas etapas se definen por las cotas de coronamiento de cada una de ellas, las cuales se presentan a continuación:

- Etapa N°1: 518 msnm
- Etapa N°2: 538 msnm
- Etapa N°3: 578 msnm

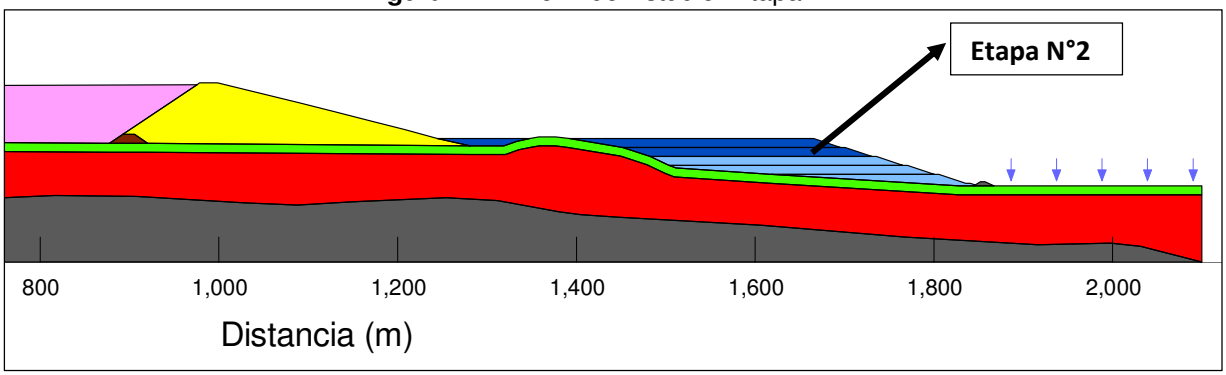
Se presenta a continuación el perfil tipo utilizado para el análisis de estabilidad con cada una de las etapas de crecimiento:

**Figura 1 - 3:** Perfil de Estudio- Etapa N°1



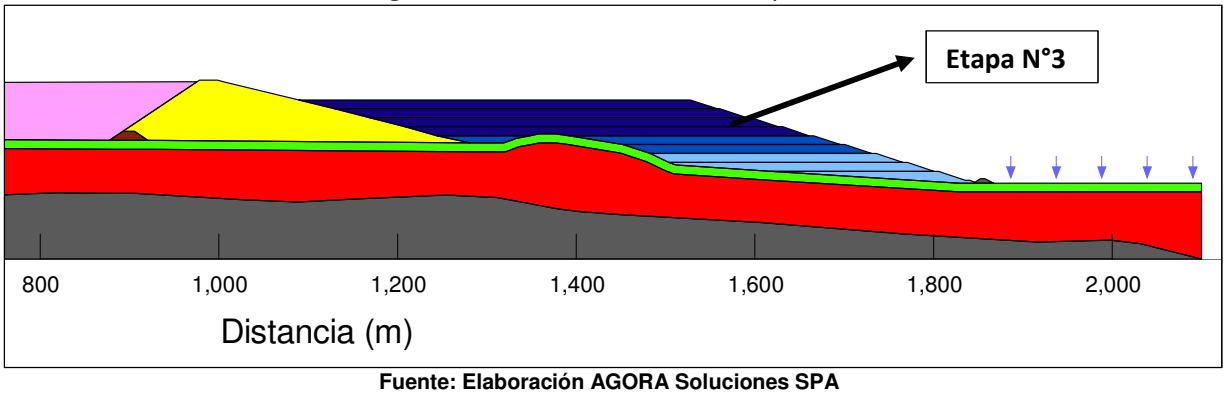

**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

**Figura 1 - 4:** Perfil de Estudio- Etapa N°1




**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

**Figura 1 - 5:** Perfil de Estudio- Etapa N°1




**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

Es importante mencionar que el análisis de estabilidad de taludes realizado en este informe considera la evaluación de cada una de las fases establecidas en el D.S Nº248 “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relave” (REF. 7).

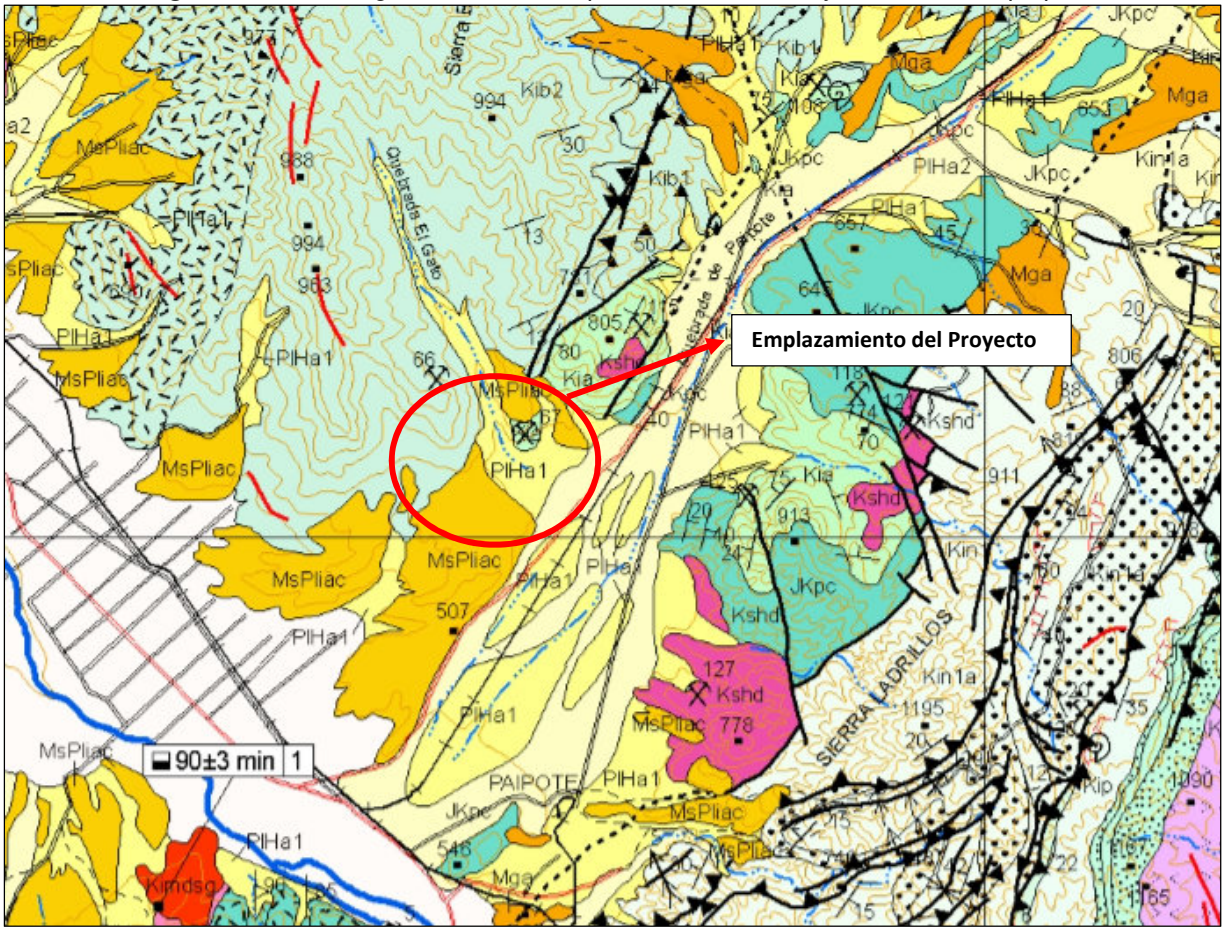
# 5 CARACTERIZACION GEOTECNICA DE LOS MATERIALES

La caracterización geotécnica de los materiales involucrados en el análisis de estabilidad del depósito de relaves, propiedad de S.C.M Atacama Kozan, se ha efectuado principalmente a partir del análisis de antecedentes existentes (presentados en el Capítulo 3 del presente informe) e información existente.

## 5.1 SUELO DE FUNDACION

De la revisión de la carta geológica, indicada en la REF.8, se puede observar que el depósito de relaves se emplaza sobre depósitos aluviales inactivos, compuestos principalmente por gravas y arenas no cohesivos a medianamente consolidados (PlHa1) y depósitos aluviales y coluviales antiguos, compuestos principalmente por: ripios a gravillas, arenas, limos y arcillas (MsPliac). El área del proyecto se emplaza sobre la quebrada de Paipote, en un punto muy cercano a la confluencia de esta con el Rio Copiapó. La quebrada El Gato se encuentra confinada por la Sierra Bandurrias, compuesta por la Formación Bandurrias (lavas andesiticas – Kib2), sobre esta sierra se observa una falla tipo de falla inversa, no inferida bajo el área de emplazamiento del depósito de relaves.

**Figura 1 - 6:** Geología de la Área Emplazamiento del Proyecto, Carta Copiapó

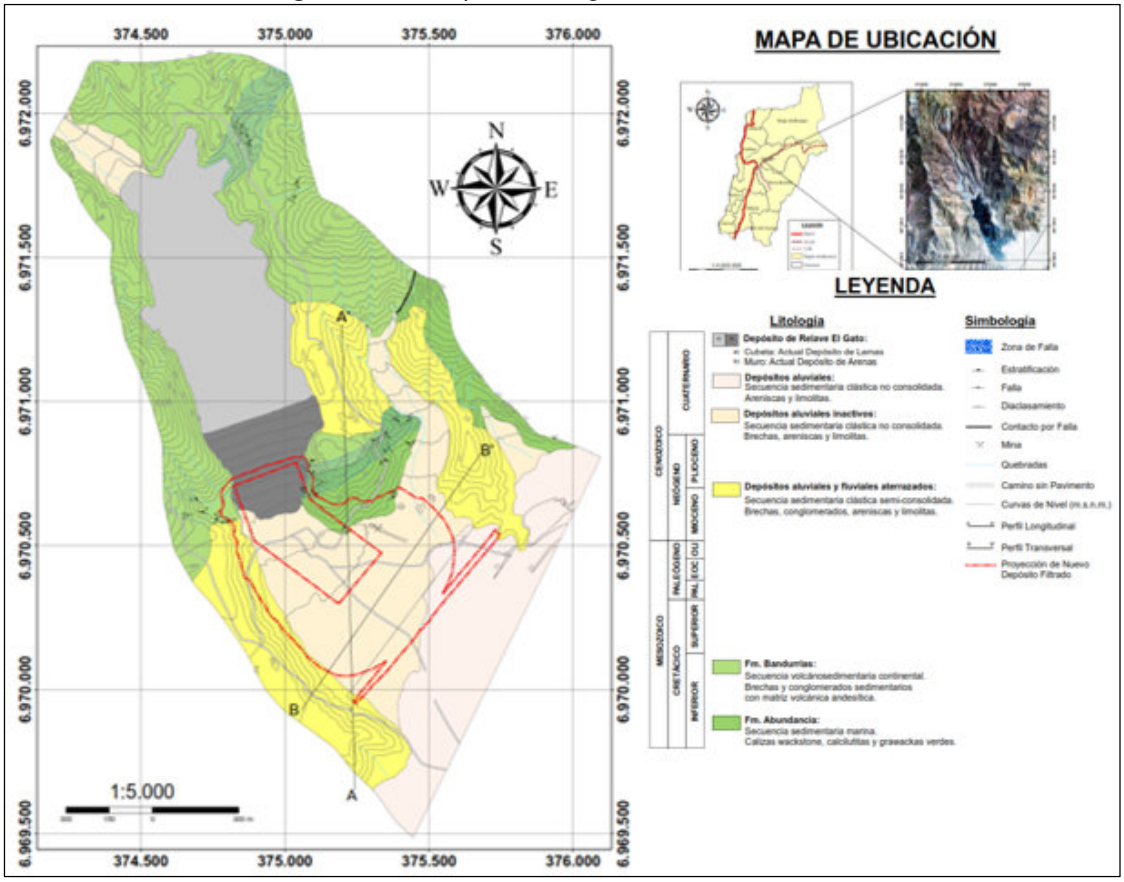



**Fuente: Servicio Nacional de Geología y Minería**

Un mapeo geológico realizado en la zona de emplazamiento del futuro depósito de relaves filtrado, concuerda con lo señalado anteriormente con respecto a que el suelo de fundación corresponde principalmente a depósitos aluviales inactivos, conformados por matriz de arena, limo y arcillas

Debido a la extensión de los depósitos mencionados, se modela el suelo de fundación como una única unidad representada por una resistencia al corte característico, lo cual puede observarse en la figura 1 - 7, de todas maneras se modelará bajo este suelo de fundación un macizo rocoso impenetrable.

**Figura 1 - 7:** Mapeo Geológico Quebrada El Gato




**Fuente: Elaboración JO Ingeniería, Informe de Prospección Geotécnica**

Los parámetros de resistencia al corte adoptados para el suelo de fundación y los muros materializados con empréstito, se obtienen del informe indicado en la REF. 3, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 1 - 1**: Parámetros Resistentes del Suelo de Fundación y Material de Empréstito (REF.5)

| Unidad | | Suelo de Fundación | Muro Empréstito |
|---|---|---|---|
| **Densidad (ɣ)** | **T/m³** | 1,9 | 2,0 |
| **Cohesión (C)** | **KPa** | 0,2 | 5 |
| **Ángulo de Fricción Interna (Ø)** | **(º)** | 37 | 37 |

**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

## 5.2 RELAVES

Los parámetros resistentes de los relaves que componen la estructura, han sido obtenidos de las campañas geotécnicas realizadas en la faena S.C.M Atacama Kozan por el laboratorio certificado de mecánica de suelos ONE GEOTECNIA. Esta información presenta condiciones drenadas y no drenadas para las arenas del muro (sección gruesa), lamas de la cubeta (sección fina) y relaves filtrados (granulometría integral).

Considerando la alta permeabilidad del muro de arenas y la existencia de drenes basales al interior del prisma resistente (muro de arenas), se considerará la condición drenada para éste. Con respecto al proyecto del depósito de relaves filtrados que se emplazará sobre el muro de arenas, también se considera la instalación de drenes basales; por lo cual para los parámetros geotécnicos también se considera únicamente la condición drenada. Para el caso específico de la cubeta (lamas de relave), se considerarán los parámetros geotécnicos en condición no drenada.

En relación a las lamas depositadas que se encuentran en una condición no drenada, se aplicará en este caso lo exigido por la “Fase II”, del D.S Nº248 “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relave” (REF.7)

Los parámetros considerados para el análisis de estabilidad de taludes se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 1 - 2**: Parámetros Resistentes del Relave (REF.3)

| Unidad | | Arenas de Relave | Lamas de Relave | Relaves Filtrados |
|---|---|---|---|---|
| **Densidad (ɣ)** | **T/m$^3$** | 1,85 | 1,65 | 2,0 |
| **Cohesión (C)** | **KPa** | 0 | 1 | 2 |
| **Ángulo de Fricción Interna (Ø)** | **(º)** | 34 | 30 | 37 |
| **Resistencia Residual No Drenada** | **($S_r/\sigma'_v$)** | | 0,13 | |

**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

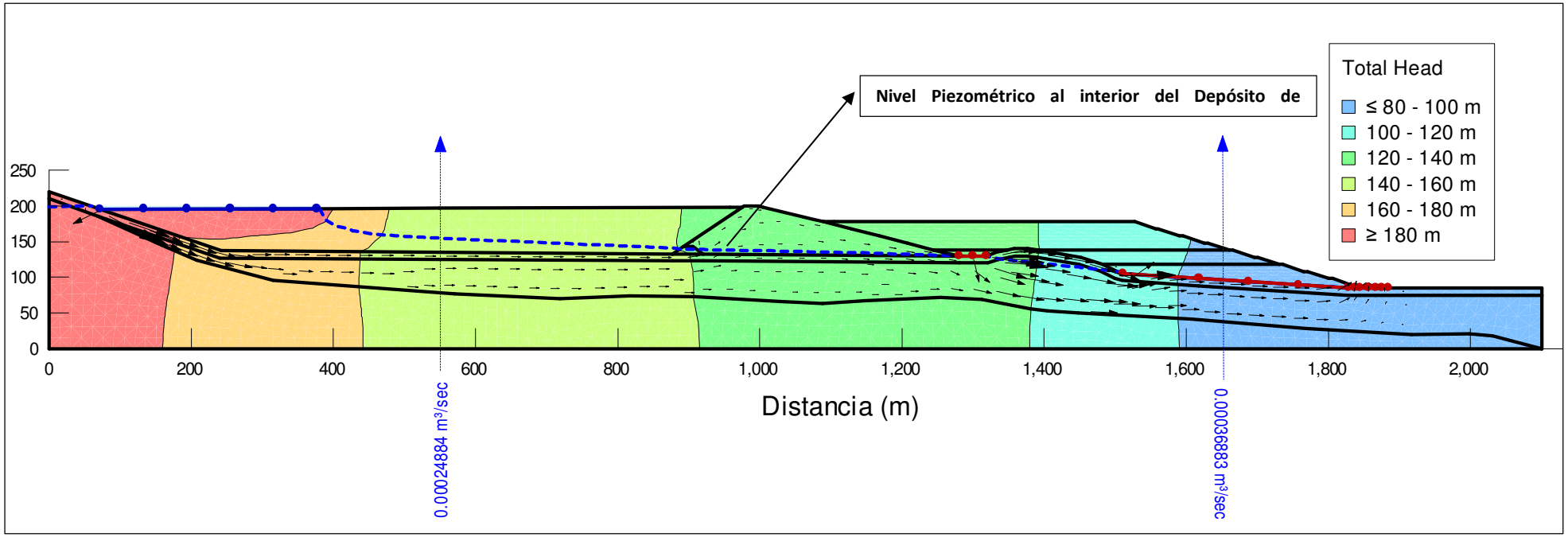
DadA la condición de operación del actual depósito, no se considerarán los efectos de envejecimiento o aumento de las propiedades geotécnicas del depósito para las “FASES I, II y III”, entregando de esta manera valores más conservadores.

Según lo informado trimestralmente al Sernageomin, en el informe E700 no existe presencia de niveles piezométricos al interior del depósito. Es por esto que se realizó un modelo en el software SEEP/W, considerando un estado estacionario en la infiltración del depósito para un modelo completamente saturado. Las permeabilidades fueron estimadas mediante la granulometría obtenida de los suelos y relaves, utilizando el método de las curvas de Breddin y se considera que para la horizontal y vertical tienen el mismo valor.

La utilización de esta metodología para estimar los niveles piezométricos resulta ser más conservadora que estimar por experiencia del consultor un nivel piezométrico.

En la figura 1 – 8, se presenta el perfil utilizado para el análisis de estabilidad con el nivel piezométrico obtenido por el software SEEP/W.

**Figura 1 - 8:** Perfil de Estudio Con Niveles Piezométricos




**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

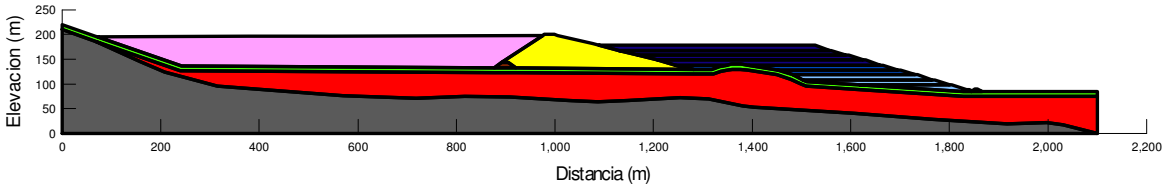
# 6 ANALISIS DE ESTABILIDAD

En el siguiente capítulo se detalla el análisis de estabilidad del depósito de relaves, considerando la estabilidad global de éste.

El estudio se ha centrado en el análisis de estabilidad de taludes bajo condiciones estáticas y sísmicas (pseudo-estáticas), utilizando para esto el perfil presentado en la Figura 1-9. Es importante recordar que el análisis se realizará para las etapas de crecimiento N°1, N°2 y N°3 del depósito de relaves filtrado.

**Figura 1 - 9:** Perfil[1] de Estudio para Análisis de Estabilidad de Taludes

| Color | Name | Model | Unit Weight (kN/m³) | Cohesion' (kPa) | Phi' (°) | Tau/Sigma Ratio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Roca Basal | Bedrock (Impenetrable) | | | | |
| | Gravas de Atacama | Mohr-Coulomb | 19 | 0.2 | 37 | |
| | Suelo de Fundacion | Mohr-Coulomb | 19 | 0.2 | 37 | |
| | Arenas de Relave | Mohr-Coulomb | 18.5 | 0 | 34 | |
| | Lamas | S=f(overburden) | 16.5 | | | 0.13 |
| | Relave Filtrado - Etapa 1 | Mohr-Coulomb | 20 | 2 | 37 | |
| | Muro de Emprestito | Mohr-Coulomb | 20 | 5 | 37 | |
| | Relave Filtrado - Etapa 2 | Mohr-Coulomb | 20 | 2 | 37 | |
| | Relave Filtrado - Etapa 3 | Mohr-Coulomb | 20 | 2 | 37 | |




**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

## 6.1 METODOLOGIA

El análisis de estabilidad (estático y pseudo-estático) aplica métodos de equilibrio límite (MEL), esta metodología de cálculo es ampliamente utilizada y aceptada para este tipo de obras civiles. El método consiste en definir superficies potenciales de deslizamiento en diferentes sectores o perfiles del talud. En estas superficies potenciales se calculan y comparan las fuerzas que tienden a originar un deslizamiento (fuerzas solicitantes o externas) y las fuerzas de corte (fuerzas resistentes o internas) que tienden a evitarlo. El resultado obtenido mediante la división de estos valores es lo que se conoce como factor de seguridad (F.S) entre las fuerzas resistentes y solicitantes.

La aplicación de estos métodos se realiza generalmente a través de programas de cálculo (software) especializados, que son capaces de analizar una gran cantidad de superficies potenciales de deslizamiento y determinan factores de seguridad asociados a ellas. Para los

[1] El perfil de referencia presentado solamente contiene los parámetros de lamas de relaves para la condición de operación (resistencia residual no drenada)

cálculos desarrollados en el presente informe se ha utilizado un análisis en 2 dimensiones, mediante el software de cálculo **SLOPE/W, versión 2016.**

Para evaluar la estabilidad de la estructura se utilizó el método de equilibrio plástico-límite y bidimensional de Morgenstern-Price, que satisface los equilibrios de fuerza y momento. Los análisis se realizaron considerando no sólo el valor de Factor de Seguridad alcanzado sino también la morfología y el volumen de las superficies de falla asociadas, ya que deslizamientos menores no afectan el comportamiento mecánico y la estabilidad del depósito. En estos métodos, el análisis sísmico se realiza mediante un estudio pseudo-estático, en el cual las cargas sísmicas se incorporan a través de un coeficiente sísmico.

## 6.2 PERFIL DE ESTUDIO

Se ha adoptado como perfil de estudio aquel ubicado en la zona más desfavorable desde el punto de vista geométrico del depósito, considerando como principales aspectos para su elección la altura y ángulo del talud e inclinación del suelo de fundación.

Se ha definido un perfil de estudio para los análisis de estabilidad del depósito actualmente en operación. En la figura 1 - 1 del capítulo 2 se presenta el detalle de la ubicación de este perfil.

El perfil en cuestión se seleccionó con la finalidad de evaluar la condición de estabilidad del depósito en el sector donde el suelo de fundación presenta la pendiente más pronunciada y a la sección transversal de mayor altura.

## 6.3 ACELERACION MAXIMA Y COEFICIENTE SISMICO

Los antecedentes sísmicos para la evaluación de la estabilidad del depósito de relaves fueron obtenidos mediante una revisión de variados estudios de amenaza sísmica, realizado por distintas empresas mineras localizadas en la comuna de Tierra Amarilla y Copiapó. Estos antecedentes se encuentran disponibles en el "Informe de Riesgo Sísmico", elaborado por JO Ingeniería para S.C.M Atacama Kozan el año 2016 (REF. 4)

Los análisis determinísticos presentados en los diversos estudios revisados, proponen tres escenarios sísmicos, cuyas características principales se detallan en la Tabla 1-3.

**Tabla 1 - 3**: Principales Escenarios Sísmicos Región de Atacama

| Escenario | | Profundidad (Km) | Distancia Hipocentral (Km) | Ms | Aceleración Basal (g) |
|---|---|---|---|---|---|
| I | Chañaral 1918 | 60 | 90,90 | 8,2 | 0,374 |
| II | Copiapó 1819 | 57 | 58,57 | 8,3 | 0,522 |
| III | Recreación Máximo Creíble | 49,6 | 53,22 | 8,5 | 0,646 |

**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

Con estos antecedentes se adoptó como sismo de diseño para la fase operacional aquel presentado por el Escenario II y para la fase de cierre el representado por el Escenario III.

Para la definición del coeficiente sísmico horizontal, $K_H$, se consideraron las relaciones propuestas por Saragoni, R (REF.9).

$$K_H = 0{,}3 \cdot \frac{a_{max}}{g} \qquad \text{con: } a_{max} \leq 6{,}6\ (^{m}/_{s^2}) \qquad \text{Sismo Interplaca}$$

$$K_H = 0{,}22 \cdot \sqrt[0{,}33]{\frac{a_{max}}{g}} \qquad \text{con: } a_{max} \geq 6{,}6\ (^{m}/_{s^2}) \qquad \text{Sismo Interplaca}$$

Donde:

- g: Aceleración de gravedad
- $a_{max}$: Aceleración máxima de campo libre estimada en la zona de fundación de la estructura analizada

Con el fin de compatibilizar el criterio propuesto por el Sr. Rodolfo Saragoni y la experiencia de AGORA SOL en proyectos de similares características, se adopta un coeficiente sísmico horizontal, para la fase de operación del depósito de relaves igual a $K_H$=0,17, valor representativo para el sismo de diseño.

Si bien, el sismo de diseño para la condición de cierre del depósito de relaves, está dado por el Escenario III, presentado en la Tabla 1-3, se considera pertinente utilizar las recomendaciones entregadas por SERNAGEOMIN post evento sísmico ocurrido el 27 de febrero de 2010. Teniendo en consideración lo anteriormente descrito, se ha adoptado un coeficiente sísmico horizontal, igual a $K_H$=0,21 (sismo máximo creíble), para la evaluación de la condición de estabilidad al cierre de las operaciones.

Para el caso del coeficiente sísmico vertical "$K_V$", este es considerado nulo, dado que el parámetro tiene muy poca influencia sobre los factores de seguridad calculados.

## 6.4 NIVEL PIEZOMETRICO

Como se presentó en el capítulo 5.2 del presente informe, se considera la existencia de un nivel piezométrico en:

- Relaves filtrados
- Cubeta de lamas del depósito de relaves
- Muro de arenas del depósito de relaves

Esta condición piezométrica se obtuvo mediante un análisis de infiltraciones realizada en estado de flujo estacionario, para una condición completamente saturada.

Para el caso de la condición de cierre, no se considerarán niveles piezométricos al interior del depósito, por lo cual, los parámetros utilizados para el análisis no considerarán la resistencia al corte no drenada.

Es por lo anterior, que se ha considerado un nivel piezométrico de altura variable al interior de la cubeta, que se encuentra visible en las tres unidades que componen el depósito de relaves.

## 6.5 ESCENARIO DE CÁLCULO

Los escenarios de cálculo adoptados para la evaluación de la estabilidad estática y pseudo-estática del depósito de relaves, perteneciente a la empresa S.C.M Atacama Kozan, se han definido siguiendo los criterios de análisis (Fases) establecidos en el D.S Nº248 "Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relave" (REF.7), los cuales se presentan a continuación:

- Escenario I – Etapa Operacional: Análisis de la condición de estabilidad estática y pseudo-estática del depósito asumiendo licuefacción total de las lamas almacenadas en la cubeta y la existencia de presión de poros al interior del muro resistente producto de la presencia de un nivel piezométrico. Para simular la licuefacción de las lamas se considera que éstas presentan una resistencia al corte no drenado caracterizado por la resistencia residual ($S_r$) post licuación. Este escenario evalúa las Fases I y II estipuladas en el D.S Nº248. Se ha adoptado para el presente escenario un coeficiente horizontal $K_H$=0,17.

- Escenario II – Etapa Cierre: Evaluación de la condición de estabilidad estática y pseudo-estático en la etapa de cierre del depósito, empleando para ello eventos máximos solicitantes y efectos del tiempo (envejecimiento) en las propiedades mecánicas de los materiales. Se han adoptado conservadoramente los mismos parámetros de resistencia empleados en el Escenario I y las lamas con resistencia residual post licuefacción. Este escenario corresponde a la Fase IV estipulada en el D.S Nº248. Se ha adoptado para el presente escenario un coeficiente horizontal $K_H$=0,21.

La Fase III estipulada en el D.S Nº248 (REF.3), correspondiente al análisis dinámico del depósito, se presenta en el informe 5009-GG-INF-02

## 6.6 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD

Para efectos de definir si un talud es estable, dada su geometría, propiedades y estado de carga, es necesario definir criterios de aceptabilidad para su diseño geotécnico.

Se adoptan los siguientes factores de seguridad mínimos como criterio de estabilidad. Estos corresponden a los habitualmente aplicados para el diseño de este tipo de obras y cumplen con lo exigido por la autoridad chilena (D.S Nº248).

- Condición Estática : FS = 1,5
- Condición Sísmica – Operación : FS = 1,2
- Condición Sísmica – Cierre : FS = 1,1

## 6.7 RESULTADOS

Las superficies de deslizamiento consideradas en este análisis corresponden a deslizamientos que representan un real peligro para la estabilidad del depósito de relaves y que físicamente responden al comportamiento esperado de:

- Las arenas de relave
- Las lamas de relave
- El relave filtrado

Considerando el tipo de operación del nuevo depósito de relave filtrado, se descarta el riesgo de overtopping en el sector del muro de arenas, debido a que no se considera la operación conjunta de ambos depósitos.

Los mínimos factores de seguridad se presentan en la Tabla 1-4 mientras que la geometría de las superficies de falla del análisis de estabilidad asociadas a los FS mínimos se presentan en el Anexo A.

**Tabla 1 - 4**: Resumen de Resultados Análisis de Estabilidad

| Perfil de Estudio | Lugar de Análisis | Escenario | Superficie Deslizamiento | Factor de Seguridad | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Estático | Sísmico |
| Etapa N°1 | DRF[2] | I (Operación) | Global | 3,246 | 2,028 |
| | | II (Cierre) | Global | 4,126 | 2,279 |
| Etapa N°2 | DRF | I (Operación) | Global | 2,875 | 1,766 |
| | | II (Cierre) | Global | 3,454 | 1,885 |
| Etapa N°3 | DRF | I (Operación) | Global | 2,683 | 1,622 |
| | | II (Cierre) | Global | 3,044 | 1,694 |
| Etapa N°1 | Muro de Arena | I (Operación) | Global | 3,123 | 1,767 |
| | | II (Cierre) | Global | 4,467 | 2,252 |
| Etapa N°2 | Muro de Arena | I (Operación) | Global | 3,544 | 1,901 |
| | | II (Cierre) | Global | 4,845 | 2,360 |
| Etapa N°3 | Muro de Arena | I (Operación) | Global | 6,693 | 2,732 |
| | | II (Cierre) | Global | 6,693 | 2,556 |

**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

Adicionalmente se realizó un análisis de sensibilidad para definir el $K_H$ bajo el cual el depósito de relaves, para su condición más desfavorable (etapa N°3) alcanzaría la condición de equilibrio límite, representada por un FS cercano a la unidad (F.S ≈ 1,0). El resultado obtenido indica que:

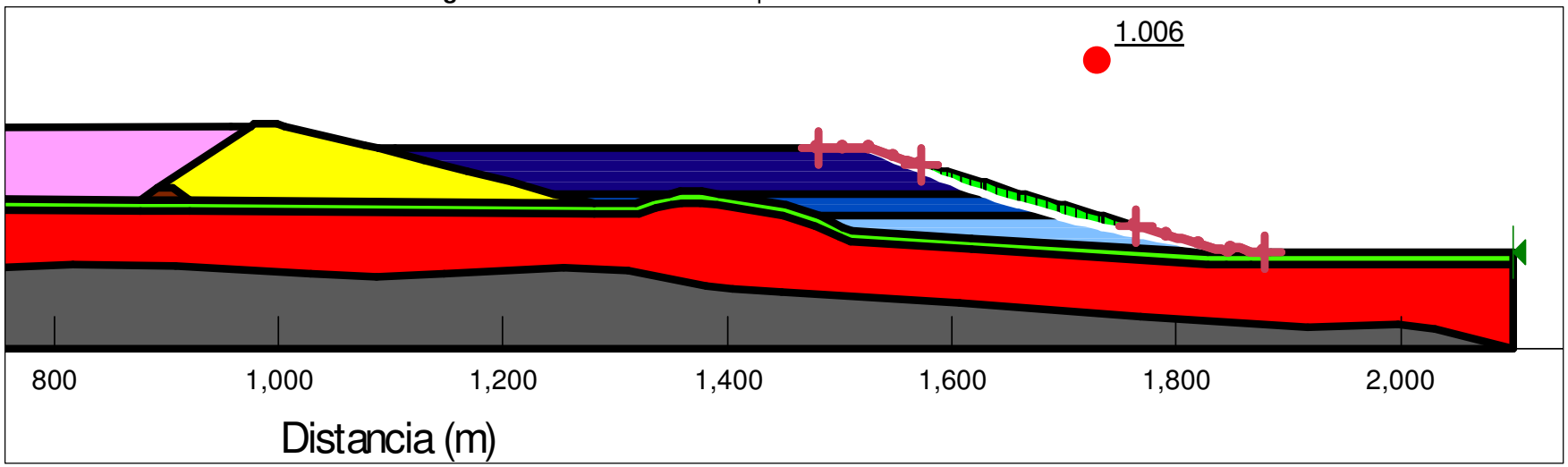
- Para el Deposito de Relaves Filtrados:
  - Un $K_H = 0,4 \rightarrow F.S = 1,006$

- Para el Muro de Arenas:
  - Un KH = 0,38 → F.S = 0,989

Se presentan en las siguientes figuras, los perfiles para cada uno de resultados presentados

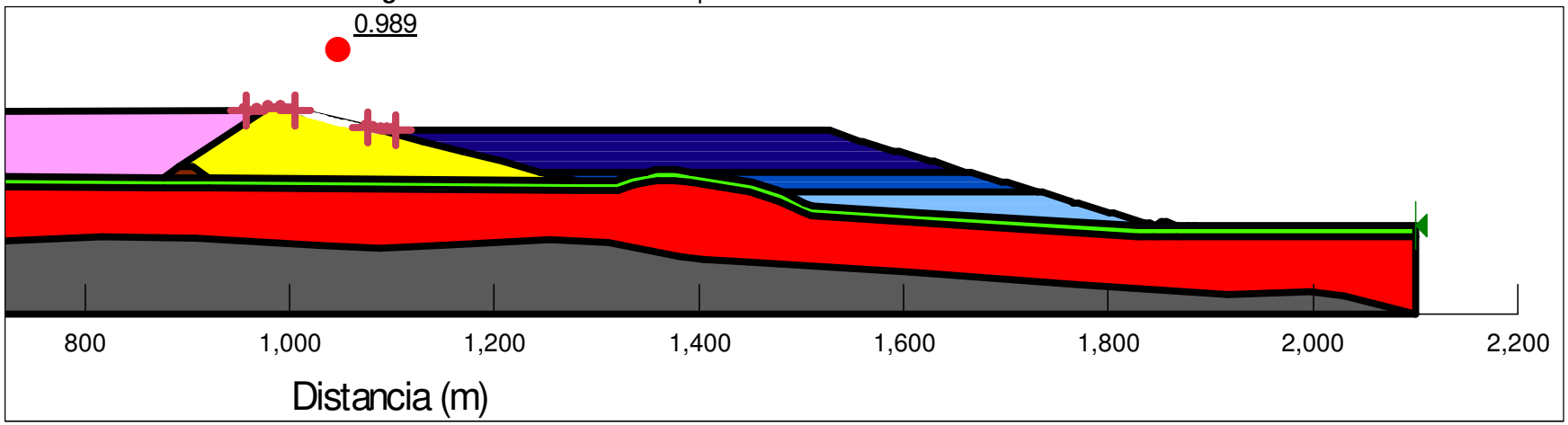
[2] DRF: Deposito de relaves filtrado

**Figura 1 - 10:** Perfil de Estudio para Análisis de Sensibilidad - DRF




**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

**Figura 1 - 11:** Perfil de Estudio para Análisis de Sensibilidad – Muro de Arenas




**Fuente: Elaboración AGORA Soluciones SPA**

# 7 CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis de estabilidad estático y seudoestático realizado para las diferentes etapas de crecimiento del depósito de relaves de la empresa S.C.M Atacama Kozan, se puede concluir lo siguiente:

- El análisis de estabilidad indica que el depósito de relaves es estable, tanto para condiciones estáticas como sísmicas (seudoestático), cumpliendo adecuadamente los criterios de seguridad mínimos adoptados y los exigidos por el D.S Nº248 para la totalidad de los escenarios de cálculo considerados.

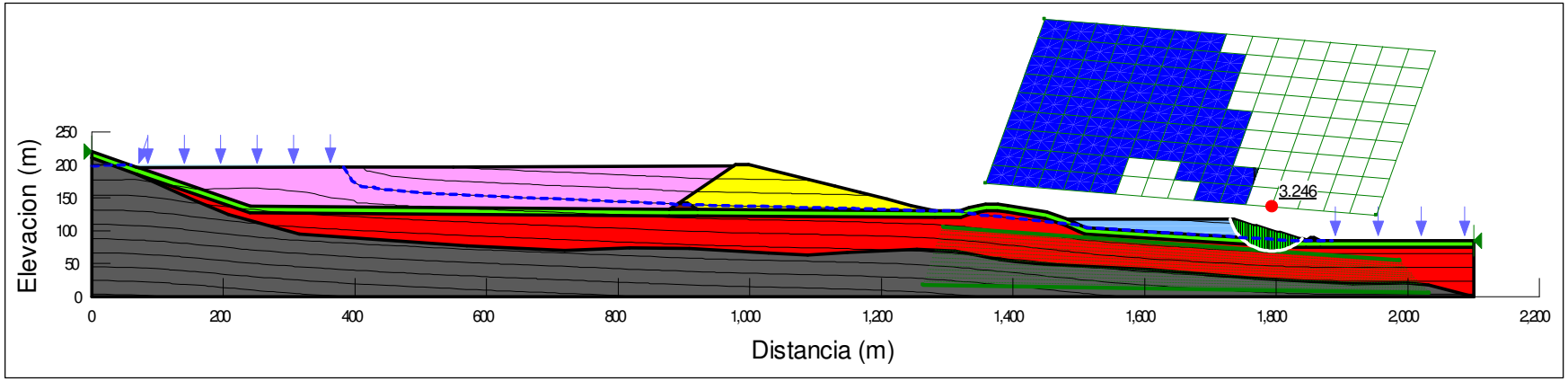
- Se determinó que ante la aparición de un nivel piezométrico, al interior del depósito, el cual se encuentre presente en todos los estratos que componen el deposito (muro de arenas, lamas de cubeta y relave filtrado), no altera la estabilidad del depósito.

- El análisis de estabilidad para la condición de Cierre (Escenario II) entrega valores más que admisibles aun cuando no se incluye en el análisis el efecto de envejecimiento o maduración de las arenas que genera que sus parámetros resistentes se incrementen con el tiempo.

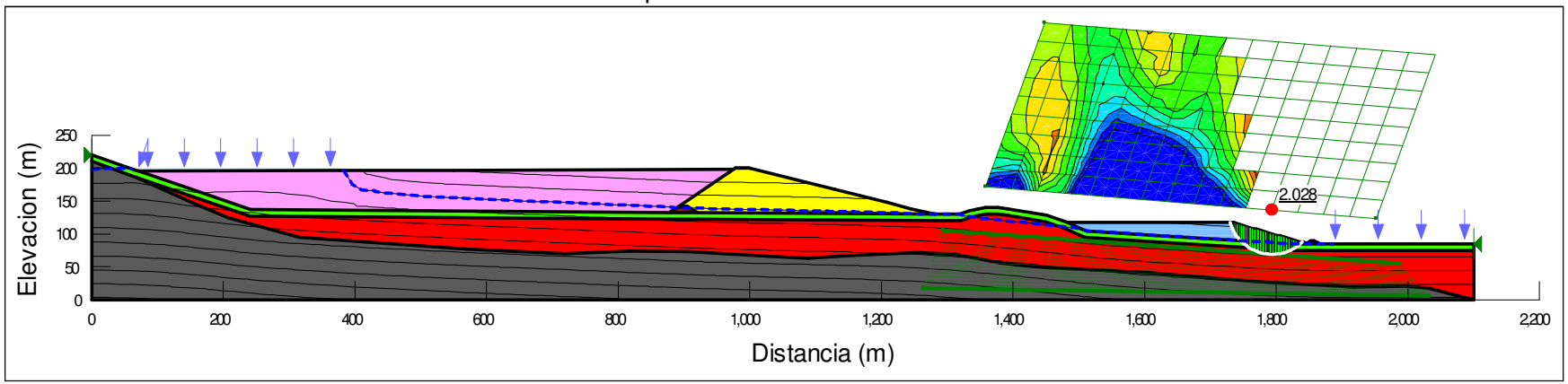
# ANEXOS

# ANEXO A
# FIGURAS POTENCIALES SUPERFICIES DE FALLA

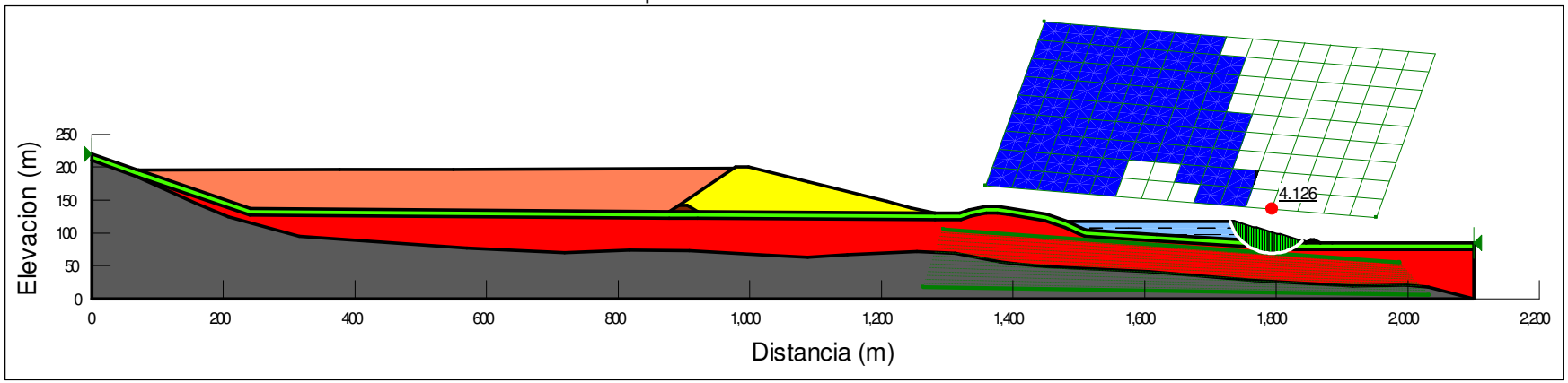
Etapa N°1 (Operación) – Condición Estática – F.S = 3,246
Depósito de Relaves Filtrado



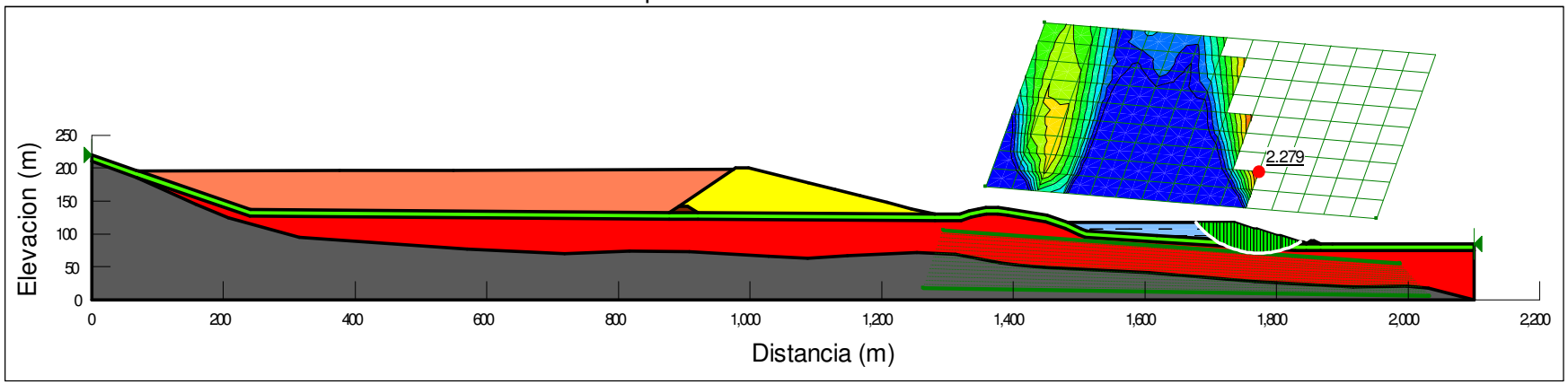

Etapa N°1 (Operación) – Condición Sísmica ($K_H$=0,17) – F.S = 2,028
Depósito de Relaves Filtrado



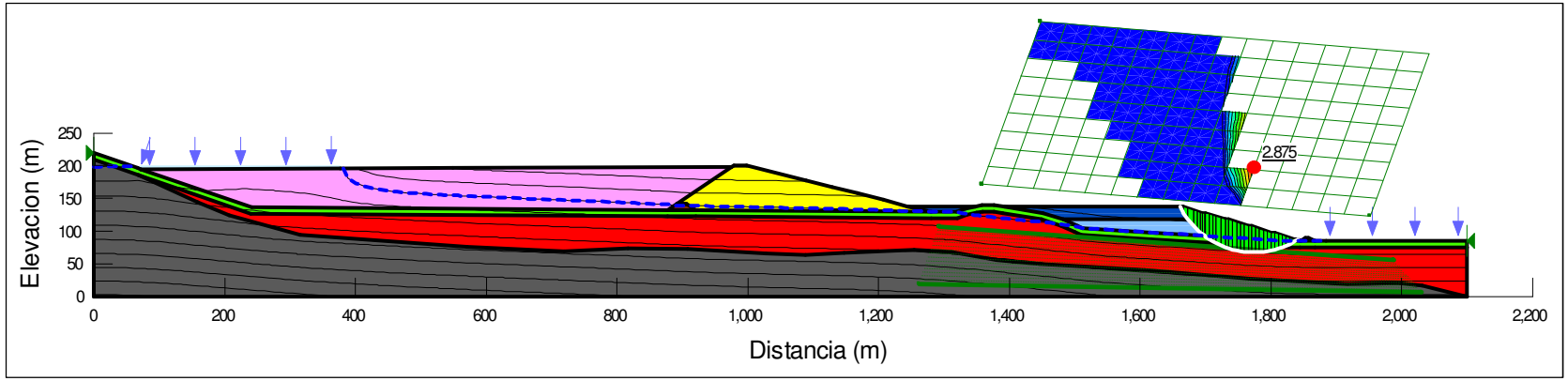
Etapa N°1 (Cierre) – Condición Estática – F.S = 4,126
Depósito de Relaves Filtrado



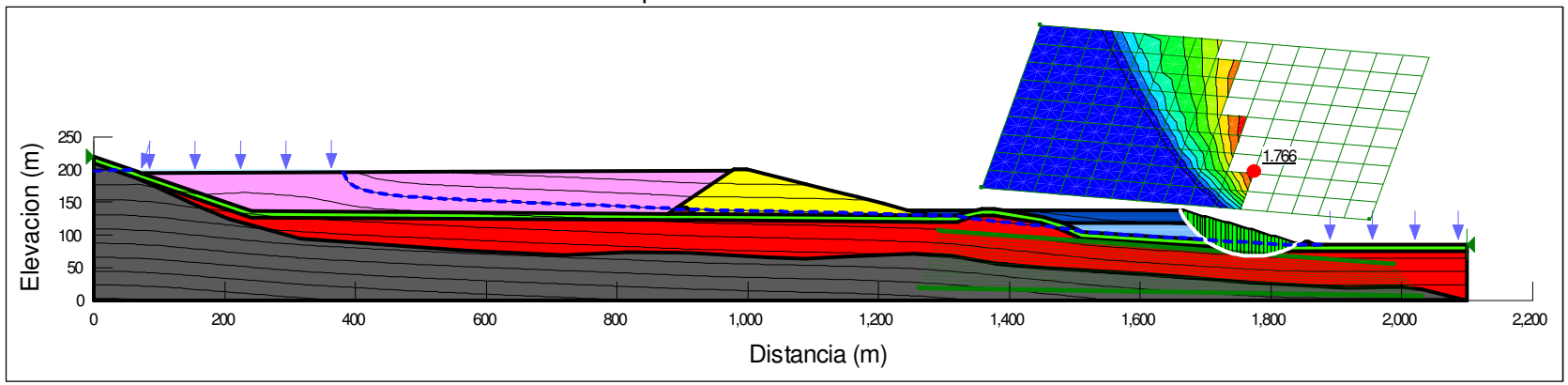

Etapa N°1 (Cierre) – Condición Sísmica ($K_H$=0,21) – F.S = 1,603
Depósito de Relaves Filtrado



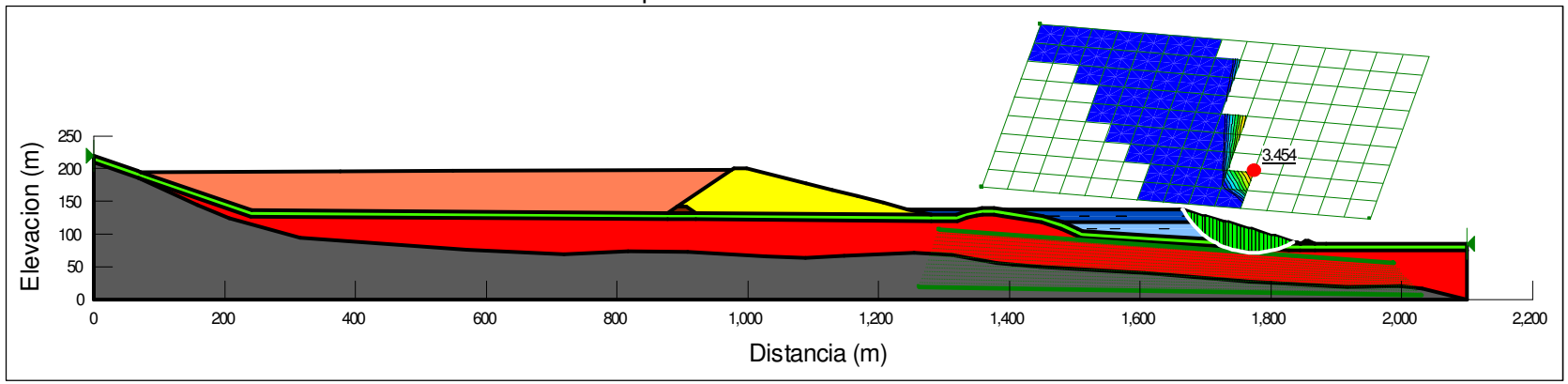
Etapa N°2 (Operación) – Condición Estática – F.S = 2,875
Depósito de Relaves Filtrado



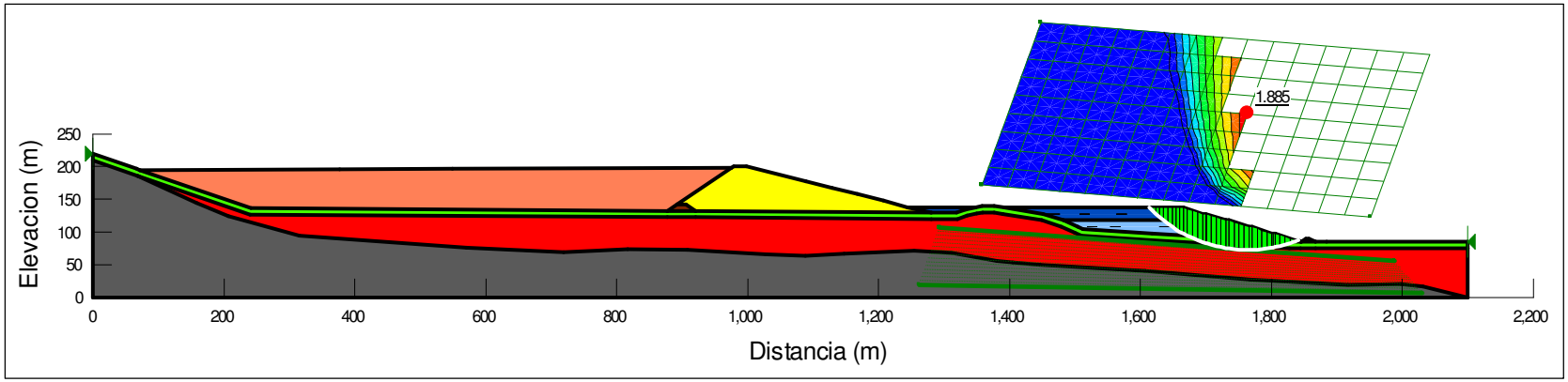

Etapa N°2 (Operación) – Condición Sísmica ($K_H$=0,17) – F.S = 1,766
Depósito de Relaves Filtrado



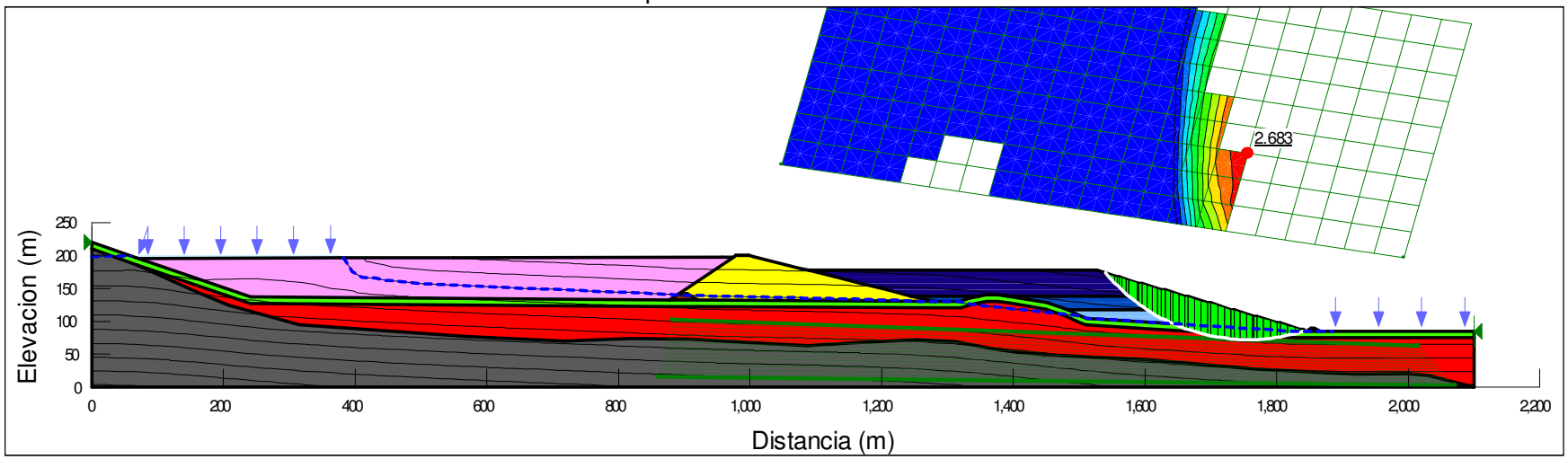
Etapa N°2 (Cierre) – Condición Estática – F.S = 3,454
Depósito de Relaves Filtrado



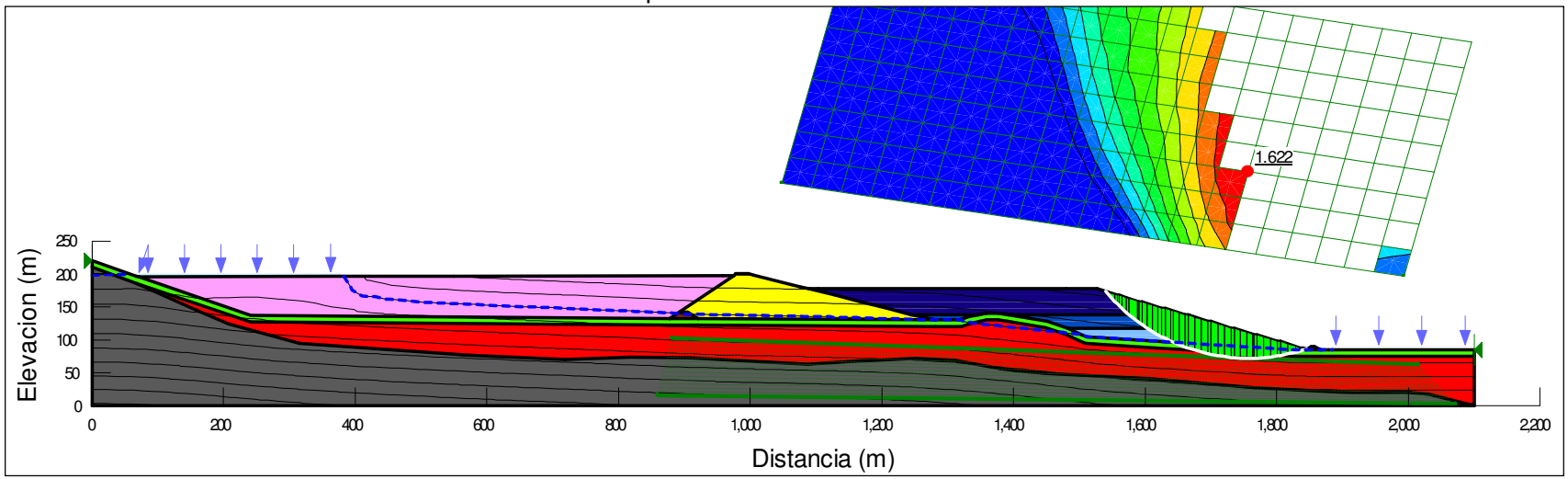

Etapa N°2 (Cierre) – Condición Sísmica ($K_H$=0,21) – F.S = 1,885
Depósito de Relaves Filtrado



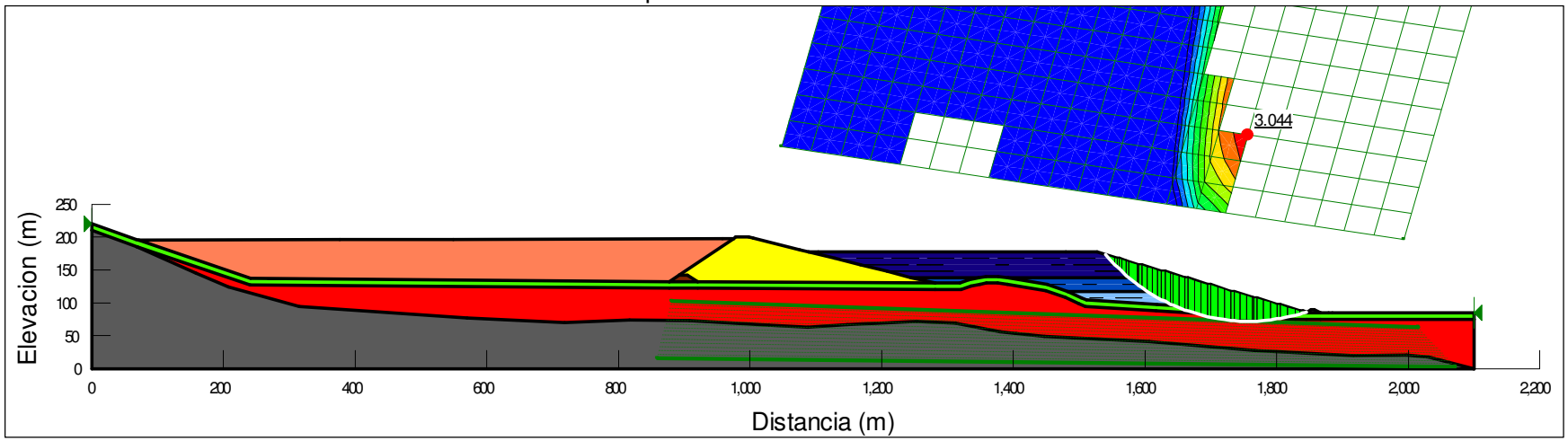
Etapa N°3 (Operación) – Condición Estática – F.S = 2,683
Depósito de Relaves Filtrado



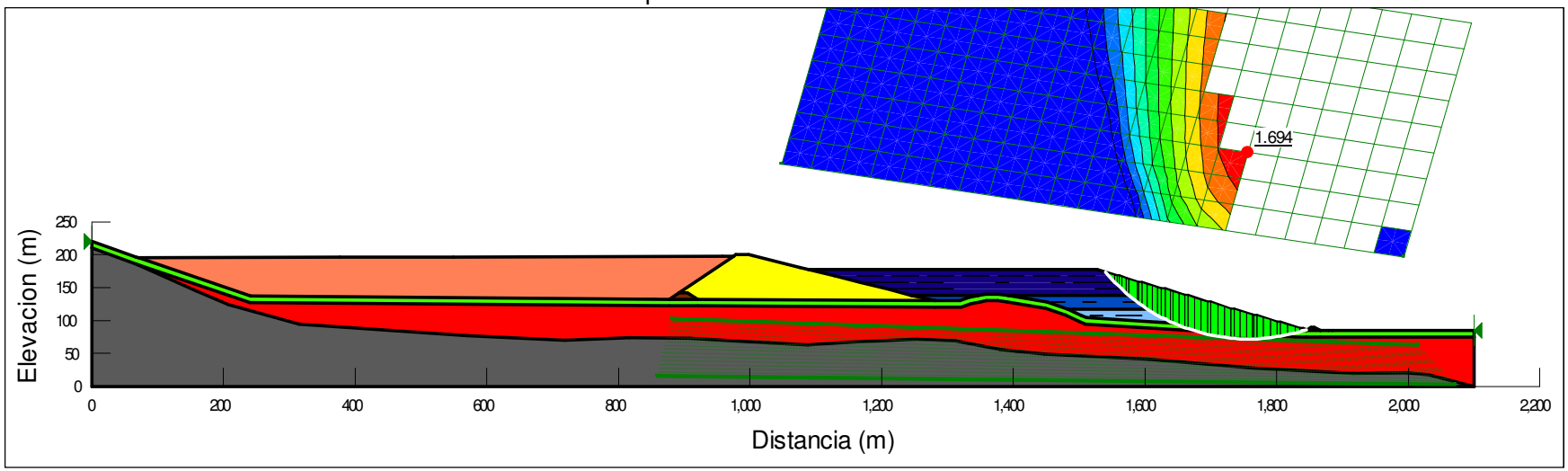

Etapa N°3 (Operación) – Condición Sísmica ($K_H$=0,17) – F.S = 1,622
Depósito de Relaves Filtrado



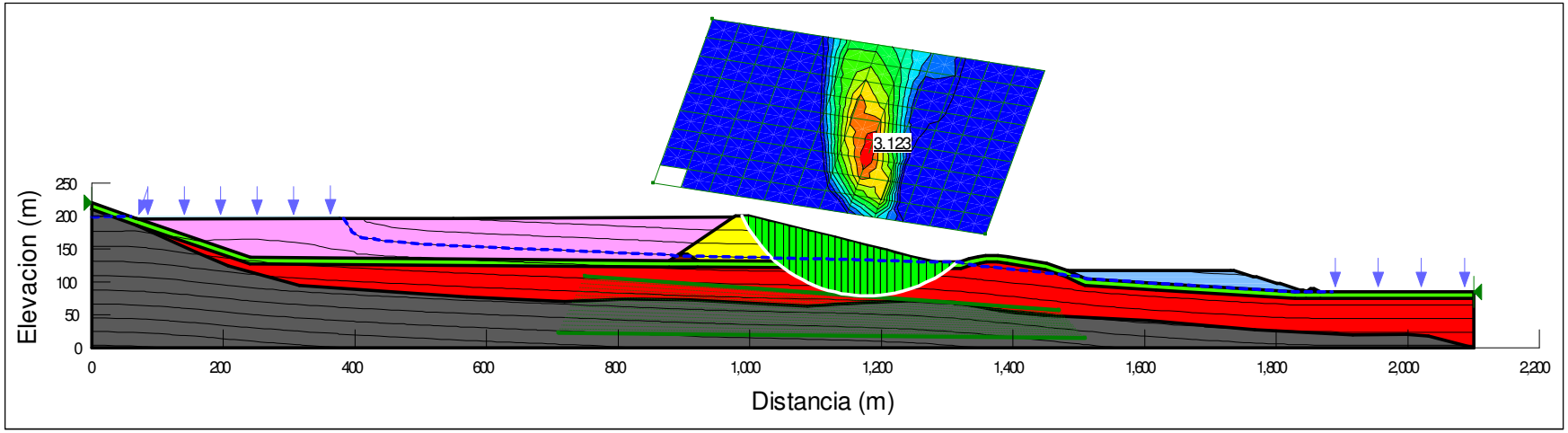
Etapa N°3 (Cierre) – Condición Estática – F.S = 2,566
Depósito de Relaves Filtrado



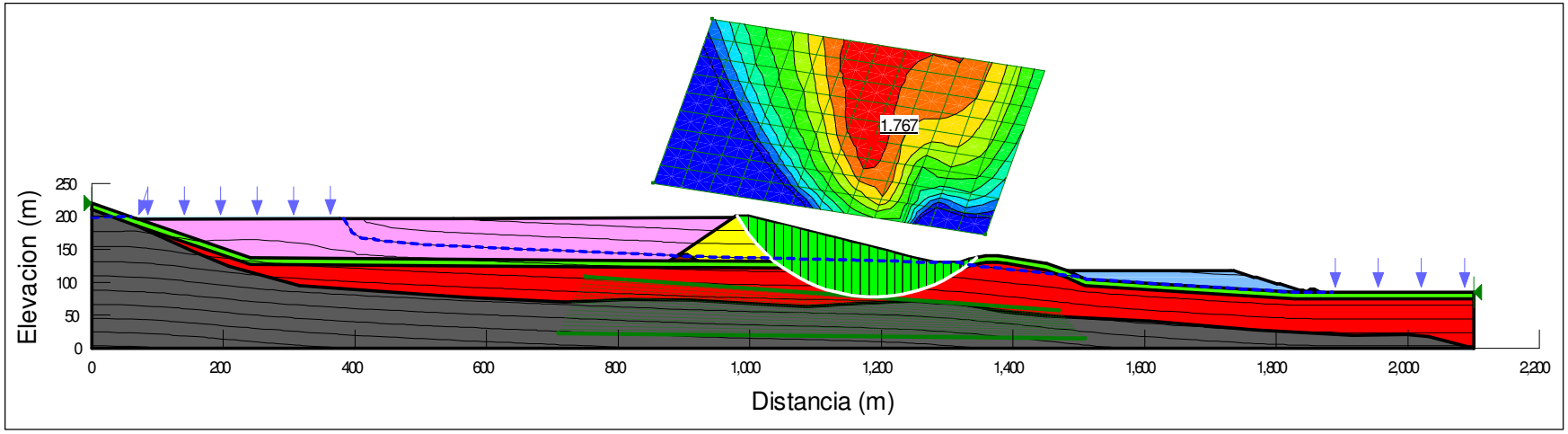

Etapa N°3 (Cierre) – Condición Sísmica ($K_H$=0,21) – F.S = 1,694
Depósito de Relaves Filtrado



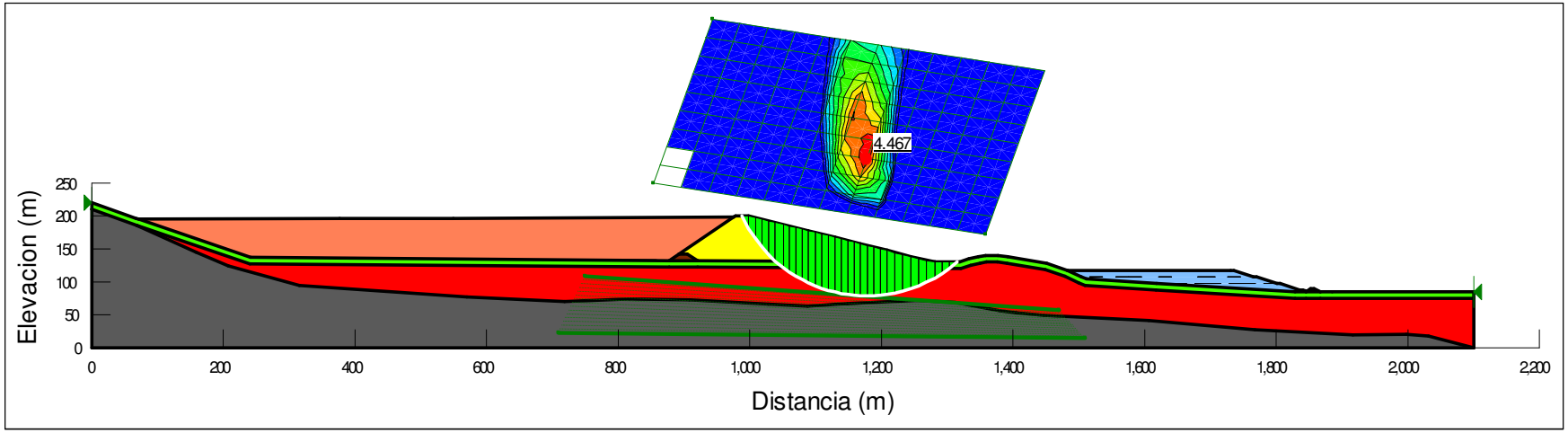
Etapa N°1 (Operación) – Condición Estática – F.S = 3,123
Muro de Arenas



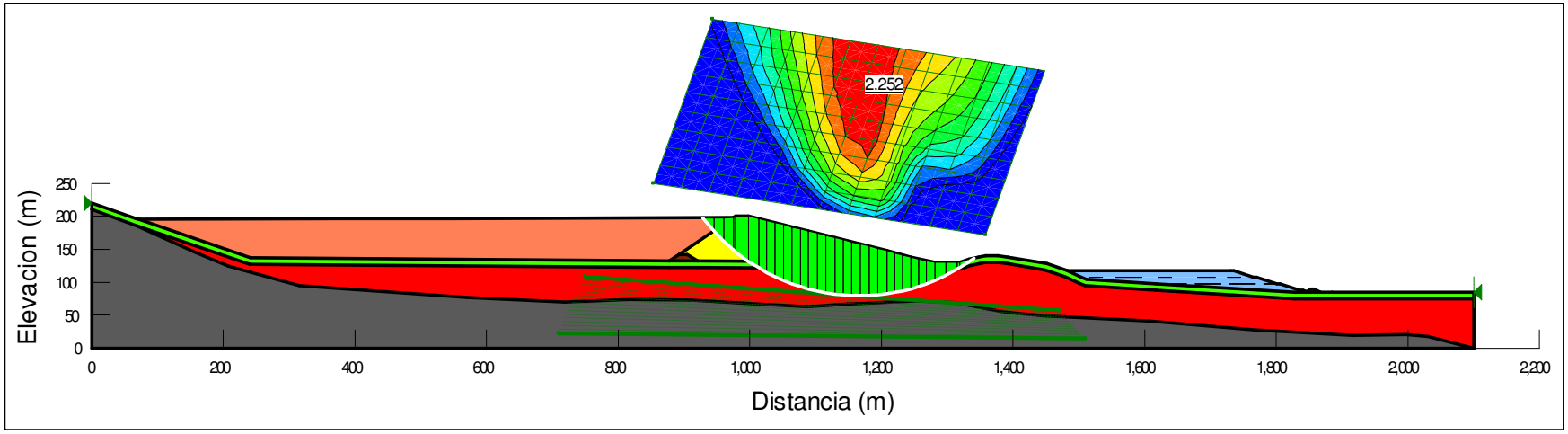

Etapa N°1 (Operación) – Condición Sísmica ($K_H$=0,17) – F.S = 1,767
Muro de Arenas



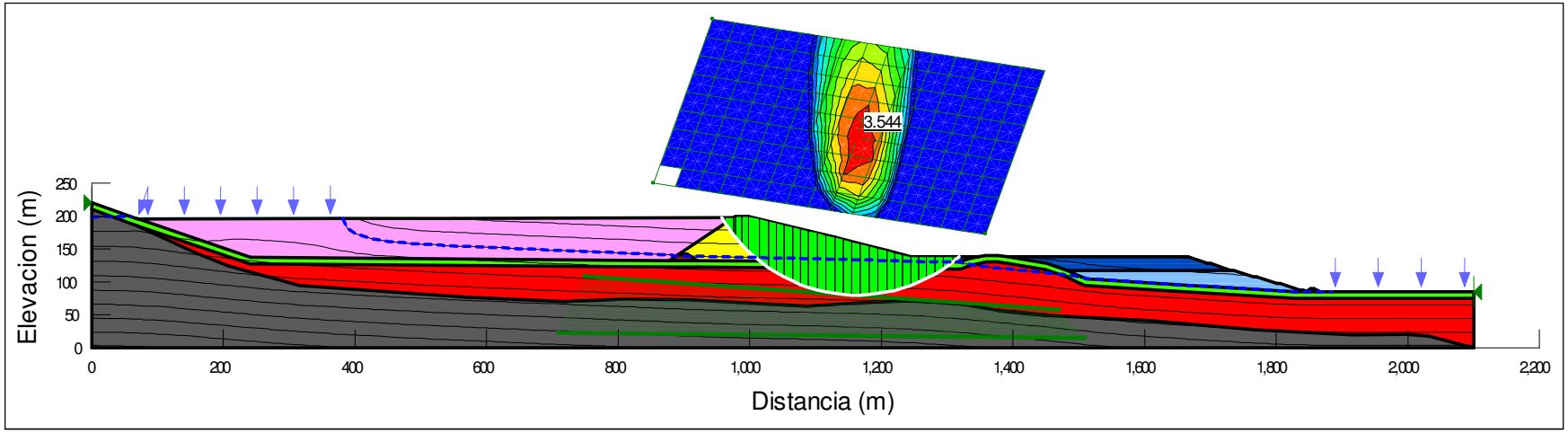
Etapa N°1 (Cierre) – Condición Estática – F.S = 4,467
Muro de Arenas



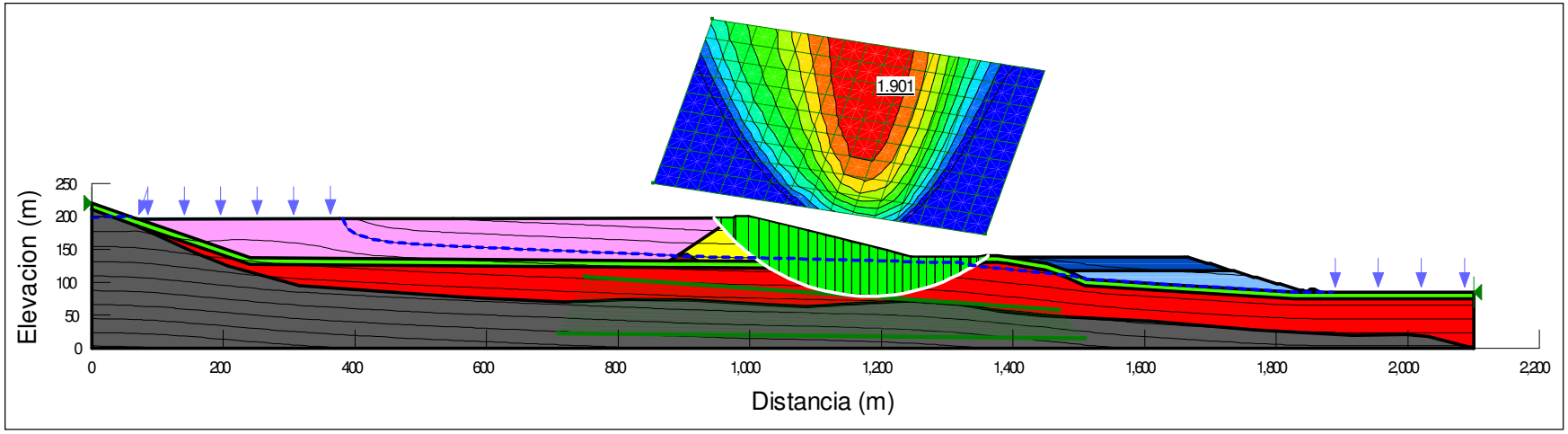

Etapa N°1 (Cierre) – Condición Sísmica ($K_H$=0,21) – F.S = 2,252
Muro de Arenas



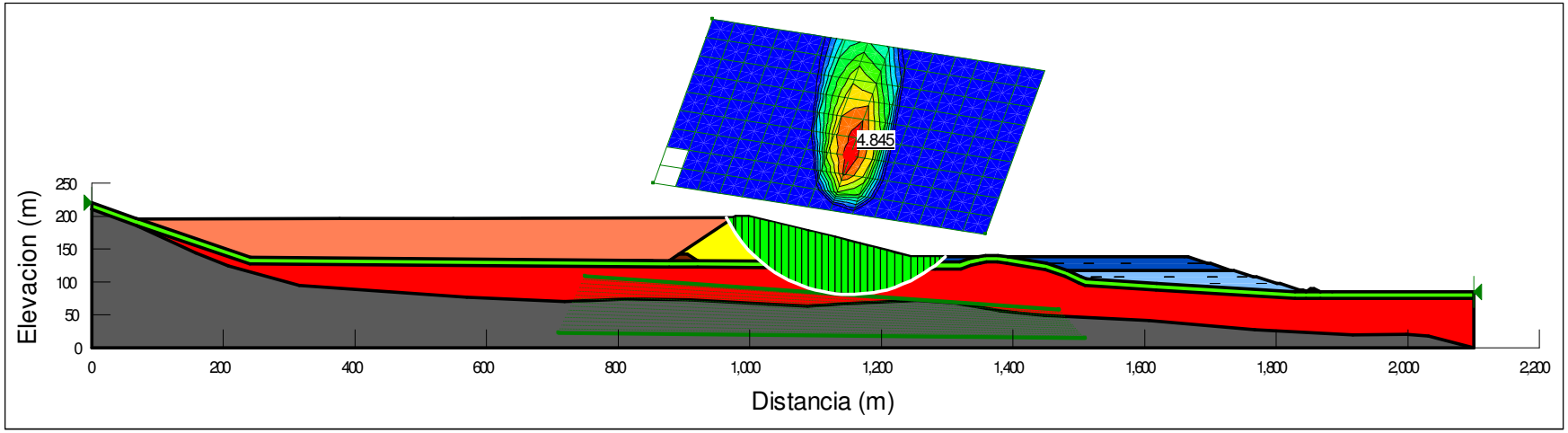
Etapa N°2 (Operación) – Condición Estática – F.S = 3,544
Muro de Arenas



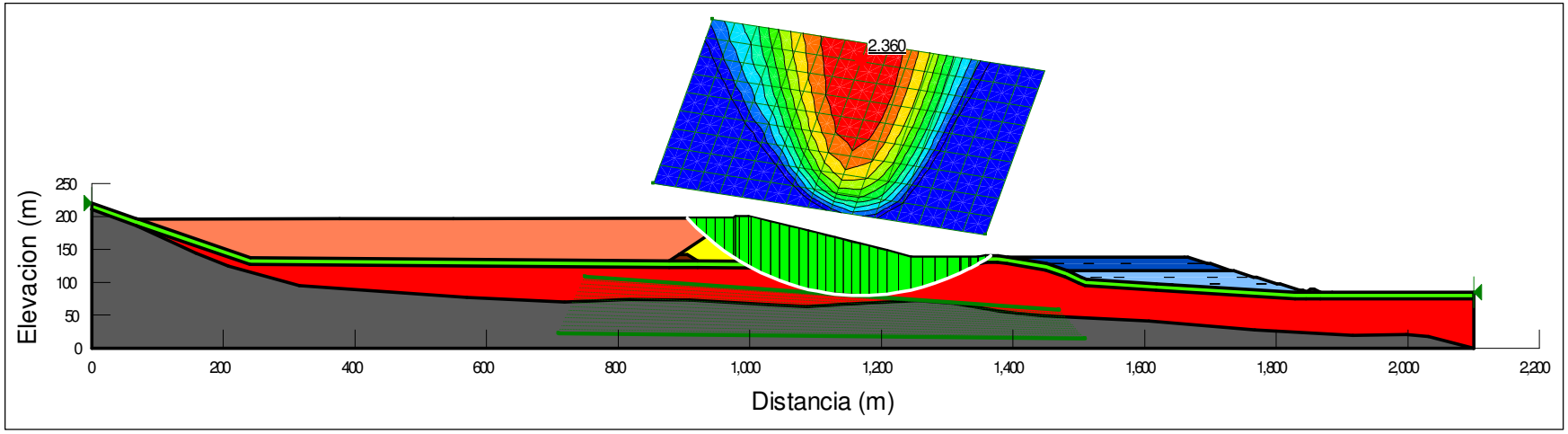

Etapa N°2 (Operación) – Condición Sísmica ($K_H$=0,17) – F.S = 1,901
Muro de Arenas



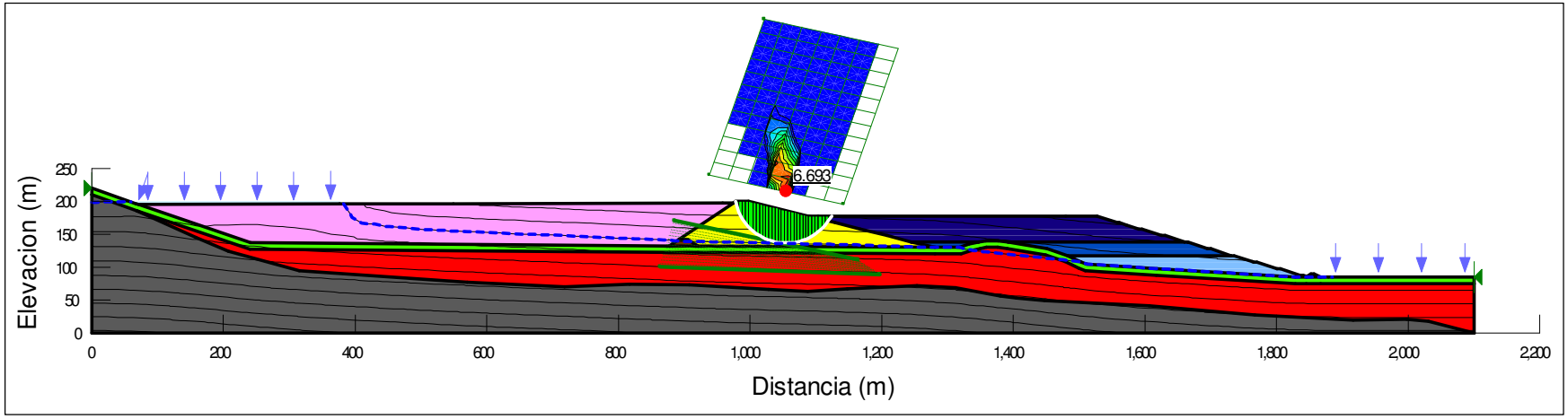
Etapa N°2 (Cierre) – Condición Estática – F.S = 4,845
Muro de Arenas



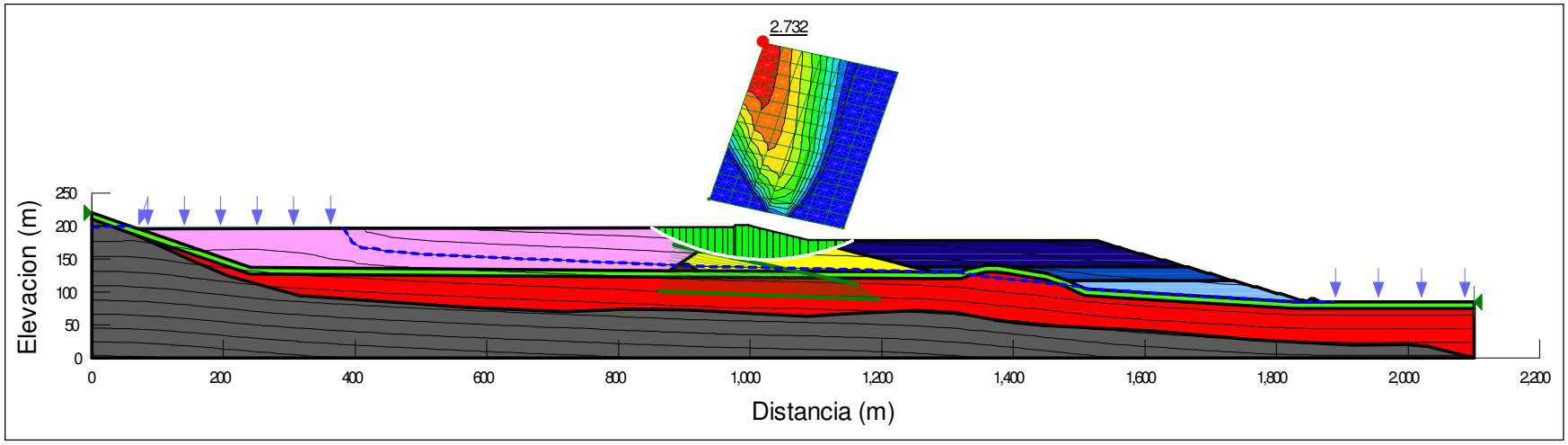

Etapa N°2 (Cierre) – Condición Sísmica ($K_H$=0,21) – F.S = 2,360
Muro de Arenas



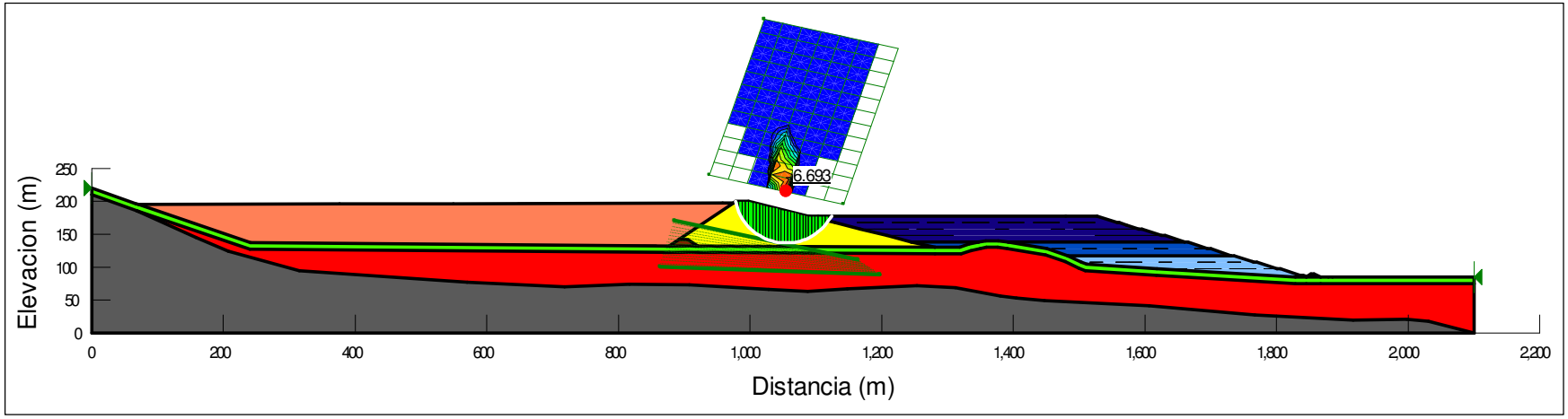
Etapa N°3 (Operación) – Condición Estática – F.S = 6,693
Muro de Arenas



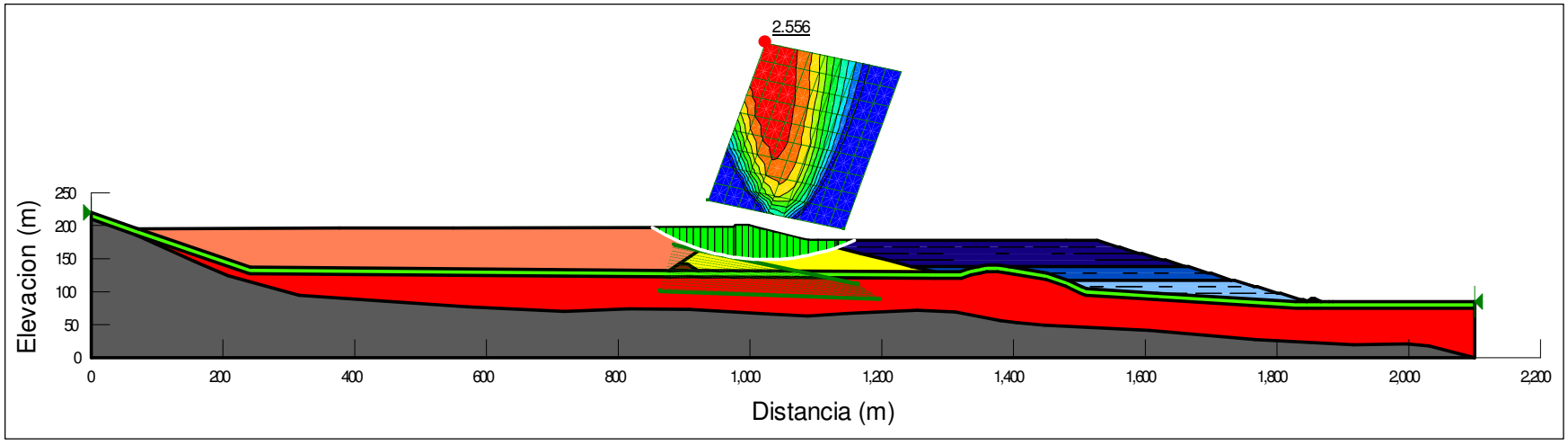

Etapa N°3 (Operación) – Condición Sísmica ($K_H$=0,17) – F.S = 2,732
Muro de Arenas



Etapa N°3 (Cierre) – Condición Estática – F.S = 6,693
Muro de Arenas




Etapa N°3 (Cierre) – Condición Sísmica ($K_H$=0,21) – F.S = 2,556
Muro de Arenas



**ANEXO B**
**INFORMES DE ENSAYOS LABORATORIO DE ENSAYOS DE MECANICA DE SUELOS ONE GEOTECNIA S.p.A (INFORME N°4613-0-17)**



Lab ONE 4613-17
Tranque El Gato FD