ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ESTÁTICA Y PSEUDO-ESTÁTICA TRANQUE EL GATO

909-GM-1355-Rev 0

SCM ATACAMA KOZAN

INFORME MATRIZ SOLICITUD PERMISO SECTORIAL PROYECTO AMPLIACIÓN TRANQUE EL GATO

Rev.	Preparado	Revisado	Aprobado
A	LGO	REA	REA
	09/03/2017	13/03/2017	17/03/17
0	Geotecnia Ambiental	YRM	
	12/05/17	11/05/17	

Valparaíso, 13 de mayo de 2017.

Ingeniería al Servicio del Medio Ambiente



INDICE

1. INTRODUCCIÓN 5

2. OBJETIVO 6

3. REFERENCIAS 6

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD 8

4.1. Aspectos Generales 8
4.2. Normativa vigente relacionada 8
4.3. Análisis de Estabilidad de Taludes 8
4.3.1. Hipótesis Generales de Cálculo 9
4.3.2. Criterios y Consideraciones del Análisis 10
4.3.3. Método de Cálculo Adoptado 12
4.3.4. Factores de Seguridad Considerados 12
4.3.5. Parámetros Geotécnicos considerados 13
4.3.6. Perfiles Geométricos utilizados 14
4.3.7. Modelos considerados 15
4.3.8. Resultados obtenidos 17

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 22

INDICE DE FIGURAS.

FIGURA 2.1 UBICACIÓN DEL TRANQUE DE RELAVES EL GATO (FUENTE: GOOGLE EARTH). 5

FIGURA 5.1 UBICACIÓN DE LOS PERFILES P1 (EJE CENTRAL, MURO PRINCIPAL) Y P2 (MURO LATERAL), TRANQUE DE RELAVES EL GATO. 14

FIGURA 5.2 DETALLE PERFIL P1, TRANQUE DE RELAVES EL GATO. 14

FIGURA 5.3 DETALLE PERFIL P2, TRANQUE DE RELAVES EL GATO. 15

FIGURA 5.4 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO PERFIL P1, TRANQUE DE RELAVES EL GATO. 16

FIGURA 5.5 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO PERFIL P2, TRANQUE DE RELAVES EL GATO. 17

FIGURA 5.6 FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO Y SUPERFICIE DE FALLA MÁS PROBABLE MURO PRINCIPAL (PERFIL P1), TRANQUE DE RELAVES EL GATO. 18

FIGURA 5.7 FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO Y SUPERFICIE DE FALLA MÁS PROBABLE MURO LATERAL (PERFIL P2), TRANQUE DE RELAVES EL GATO. 18

FIGURA 5.8 FACTOR DE SEGURIDAD PSEUDO-ESTÁTICO Y SUPERFICIE DE FALLA MÁS PROBABLE MURO PRINCIPAL (PERFIL P1), SISMO DE DISEÑO (K_H = 0.15). 19

FIGURA 5.9 FACTOR DE SEGURIDAD PSEUDO-ESTÁTICO Y SUPERFICIE DE FALLA MÁS PROBABLE MURO PRINCIPAL (PERFIL P1), SISMO MÁXIMO CREÍBLE (K_H = 0.19). 20

FIGURA 5.10 FACTOR DE SEGURIDAD PSEUDO-ESTÁTICO Y SUPERFICIE DE FALLA MÁS PROBABLE MURO LATERAL (PERFIL P2), SISMO DE DISEÑO (K_H = 0.15). 20

FIGURA 5.11 FACTOR DE SEGURIDAD PSEUDO-ESTÁTICO Y SUPERFICIE DE FALLA MÁS PROBABLE MURO LATERAL (PERFIL P2), SISMO MÁXIMO CREÍBLE (K_H = 0.19). 21

INDICE DE TABLAS.

TABLA 4.1 VALORES DE ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA EN UNIDADES DE G, PARA LOS SISMOS SMC Y SD (FUENTE: REF. 8). 10

TABLA 4.2 COEFICIENTE MÁXIMO EFECTIVO DE ACELERACIÓN (FUENTE: REF. 6). 11

TABLA 4.3 COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES ASOCIADOS A CADA SISMO EN ESTUDIO, SEGÚN LAS RELACIONES DE ATENUACIÓN DE RUIZ Y SARAGONI (1993). 12

TABLA 4.4 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS UTILIZADOS EN LA MODELACIÓN. .. 13

TABLA 5.1 RESUMEN DE FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS PARA CADA PERFIL. 22

1. INTRODUCCIÓN

El Tranque de Relaves El Gato se encuentra emplazado en la quebrada El Gato, al norte de la intersección de Quebrada Paipote y el cauce natural del río Copiapó, en la provincia de Copiapó, III Región de Atacama, Chile (Ver Figura 1.1).



Figura 1.1 Ubicación del Tranque de Relaves El Gato (Fuente: Google Earth).

Como resultado del comienzo de la extracción del mineral presente en el yacimiento de cobre SCM Atacama Kozan, el Tranque de Relaves El Gato inicia su operación el año 2003, siendo aprobado ambientalmente por la Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA) por medio de la Resolución de Calificación Ambiental N° 0006, con fecha 04 de Junio de 1997, que aprueba el proyecto "El Bronce de Atacama".

Dos meses más tarde, el 04 de agosto de 1997, el Sernageomin aprueba el proyecto de construcción y operación del tranque mediante la Resolución N° 710, dejando estipulado el compromiso por parte de la empresa responsable, de ejecutar todas las obras detalladas tanto en el Proyecto Técnico, como en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y la Resolución Exenta N° 0006.

El año 2004, la DGA presenta la resolución N° 1167, la cual aprueba el proyecto y autoriza la construcción del tranque de relaves El Gato.

Posteriormente, con base en las favorables condiciones de estabilidad global presentadas hasta el año 2012, y con el objeto de aumentar la vida útil del depósito, SCM Atacama Kozan presenta el proyecto "Aumento de Capacidad del Tranque de Relaves El Gato", el cual ingresó al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

(SEIA) a través de una DIA, siendo calificado favorablemente mediante la RCA N° 76/2012, otorgada por la COREMA de la Región de Atacama. Este proyecto consistió en aumentar la capacidad de almacenamiento del tranque por medio de la elevación de la actual cota de coronamiento hasta los 600 msnm.

Por otra parte, el proyecto de ampliación, fue aprobado sectorialmente por el Sernageomin mediante la Resolución Exenta N° 0218 del 17 de Mayo de 2013. Según los criterios establecidos en ese entonces, entre el Sernageomin y la Dirección General de Aguas (DGA), se tramitó en primer lugar, el permiso sectorial del primer servicio y una vez obtenida su aprobación, se elaboró el informe "Solicitud Permiso Sectorial Construcción Obra Hidráulica Dirección General de Aguas", con fecha 06 de septiembre de 2013. En respuesta a ese documento, la DGA presentó el Informe Técnico DARH N° 353 "Proyecto Aumento de Capacidad del Tranque de Relaves El Gato" el día 13 de noviembre de 2015, quedando pendiente su aprobación sectorial.

De esta manera, y de acuerdo a lo solicitado por la DGA, este documento está dirigido a responder las observaciones del Informe Técnico DARH N° 353 (Ref. 3), entregando los resultados de la evaluación de estabilidad estática y pseudo-estática del Tranque de Relaves El Gato.

2. OBJETIVO

El objetivo principal de este documento, es presentar los resultados del análisis de estabilidad realizado en el muro principal y muro lateral del tranque de relaves El Gato, acorde a las condiciones técnicas establecidas en el D. S. MOP N° 50/2015, que aprueba el reglamento al que se refiere el artículo 295 inciso 2°, del Código de Aguas.

3. REFERENCIAS

Los antecedentes utilizados para la elaboración de este documento, han sido recopilados a partir de información entregada por el cliente, y de documentos correspondientes a trabajos anteriores realizados por esta consultora.

Estos antecedentes son descritos a continuación, considerándose la siguiente lista como aquella que describe la numeración de cada referencia citada en este documento.

1. Dictuc Ingeniería (2016). Análisis de Estabilidad Dinámica: Proyecto de Ampliación Tranque de Relaves El Gato.
2. Dirección General de Aguas (2015). D. S. MOP N° 50/2015.
3. Dirección General de Aguas (2015). Informe Técnico DARH N° 353 Proyecto "Aumento de Capacidad del Tranque de Relaves El Gato" expediente VC-0302-40.
4. E. C. Rowe Asoc. (1996). Estudio de Tranque de Relave Quebrada El Gato.
5. Geotecnia Ambiental Ltda. (2017). Informe Geotécnico Tranque de Relaves El Gato.
6. Instituto Nacional de Normalización (1996). Norma chilena NCh 433 Of. 96 mod. 2009 Diseño Sísmico de Edificios.

7. Martínez R., Barrera S. y Gómez P. (2011). El método seudoestático de estabilidad en presas: un análisis crítico, Obras y Proyectos 9, 30-37, .
8. Riddell R. Ases. Prof. Ltda. (2015) Estudio de Riesgo Sísmico Complejo Industrial Planta Manuel Antonio Matta y Fundición Hernán Videla Lira.
9. Sanhueza C. y Rodríguez L. (2013). Análisis Comparativo de Métodos de Cálculo de Estabilidad de Taludes Finitos aplicados a Laderas Naturales, Revista de la Construcción, vol. 12, núm. 1, pp. 17-29, Pontificia Universidad Católica de Chile.
10. Servicio Nacional de Geología y Minería (2013). Resolución Exenta N° 0218 Proyecto "Aumento de Capacidad del Tranque de Relaves El Gato".

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

4.1. Aspectos Generales

SCM Atacama Kozan, representado por el Sr. Jaime Ángel, Gerente de Operaciones, ha solicitado a Geotecnia Ambiental Ltda., la elaboración de un documento técnico que permitiera responder las observaciones levantadas por la DGA (presentadas en el Informe Técnico DARH N° 353, Ref. 3), para la obtención del permiso sectorial del tranque de relaves El Gato.

Dichas observaciones, y en general, todos los aspectos de presentación, y de requerimientos técnicos se presentan en el D. S. MOP N° 50/2015 (Ref. 2), siendo uno de ellos, el análisis de estabilidad de los muros del depósito.

Por lo tanto, como respuesta a ello, este documento está dirigido a presentar los criterios considerados y los resultados de la evaluación de la estabilidad estática y pseudo-estática de los muros principal y lateral para los sismos Máximo Creíble (SMC) y de Diseño (SD).

4.2. Normativa vigente relacionada

De acuerdo al conducto regular, la DGA otorga la autorización del permiso sectorial una vez aprobado el proyecto definitivo, comprobándose que la obra no afectará la seguridad de terceros ni producirá la contaminación de las aguas.

El reglamento que establece las condiciones técnicas que deberán cumplir el proyecto, la construcción y operación de las obras, es el Artículo 295 del Código de Aguas, el que hace referencia al D. S. MOP N° 50/2015 (Ref. 2).

De acuerdo a ese documento, y según las características del proyecto Tranque de Relaves El Gato, se trataría de un embalse de categoría C, que abarca los grandes embalses, de altura máxima del muro igual o superior a 30 m, o bien, de capacidad igual o superior a 60.000.000 m^3, y para los cuales se deben cumplir las condiciones técnicas más exigentes.

Para la evaluación de la estabilidad del depósito, la DGA indica en el artículo 31 (Ref. 2) que se debe realizar un análisis estático y dinámico de los muros para los sismos Máximo Creíble y de Diseño. Los criterios y consideraciones generales del análisis son presentados a continuación en la sección 4.3.

4.3. Análisis de Estabilidad de Taludes

De acuerdo a Ref. 9, los análisis de estabilidad, en el caso de las laderas naturales, tienen por objetivo estimar el nivel de seguridad de los taludes y, según el resultado obtenido, permiten implementar medidas correctivas o de estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos de masas.

Otros fines relacionados a este tipo de análisis, constituyen la caracterización geomecánica de los materiales involucrados, el estudio de los factores influyentes en la rotura y la determinación del comportamiento mecánico de los materiales de un talud cuando se han producido movimientos tendientes a la falla. Esa modalidad de análisis a posteriori, es conocido como back-analysis, y es ampliamente utilizado en

situaciones que incluso comprometen responsabilidades durante la etapa de operación de las obras.

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen fuerzas resistentes y solicitantes, las que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Los métodos se pueden agrupar en dos tipos: métodos determinísticos, dentro de los cuales están los métodos de equilibrio límite y los tenso-deformacionales; y los métodos probabilísticos.

Los más utilizados son los métodos de equilibrio límite, que permiten analizar el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y que consisten en comparar las fuerzas tendientes al movimiento, respecto a las fuerzas resistentes que se oponen la falla, a lo largo de una determinada superficie de rotura.

Los métodos de equilibrio límite se basan en la selección de una superficie teórica de rotura en el talud, según el modelo de rotura seleccionado para representar el comportamiento geotécnico del material involucrado en la estabilidad.

De acuerdo a Ref. 9, existe una subdivisión para los métodos de equilibrio límite en función de la exactitud de los resultados, donde es posible encontrar los métodos exactos y los no exactos. En el primer caso, las leyes de la estática entregan una solución exacta dada la geometría sencilla que tiene la masa de suelo que falla, por lo que allí se encuadran los cálculos realizados para roturas del tipo plano y aquellas del tipo cuñas. Por otro lado, en el segundo grupo, las soluciones de la estática no son suficientes y el problema se vuelve hiper-estático, debiendo recurrir entonces a una hipótesis inicial o a alguna simplificación para que pueda ser resuelto.

Dentro de los métodos no exactos se encuentran aquellos que consideran completa la masa de suelo que desliza, como un todo, y son conocidos como métodos de estabilidad global de la masa de terreno. Por otra parte, existen aquellos que dividen la masa deslizante en fracciones más pequeñas para simplificar el análisis, los cuales se denominan métodos de las dovelas.

A su vez, el método de las dovelas se divide en métodos precisos (teorías de Morgenstern - Price, Spencer y Bishop Riguroso) y en métodos aproximados (Janbú, Fellenius y Bishop Simplificado).

4.3.1. Hipótesis Generales de Cálculo

A continuación se presentan las hipótesis generales adoptadas para analizar la estabilidad de taludes del depósito en estudio.

- Los materiales constituyentes del modelo presentan una homogeneidad e isotropía suficientes como para asumir que los parámetros mecánicos son constantes en profundidad.
- El comportamiento del material en estudio puede ser descrito adecuadamente mediante el modelo constitutivo de Mohr – Coulomb, utilizado comúnmente para representar materiales de agregados de partículas.
- Las superficies de falla de menor seguridad, están definidas por los planos que presentan una menor resistencia al corte.
- Al tratarse de un análisis bidimensional, no se considera la influencia de los empujes internos de la masa involucrada.

4.3.2. Criterios y Consideraciones del Análisis

Los criterios y consideraciones empleadas fueron las siguientes:

- Para las modelaciones se ha considerado un drenaje basal en la interfaz de los relaves (lamas) depositados y el suelo de fundación.
- La topografía del terreno natural se ha obtenido desde un levantamiento realizado por esta consultora el año 2013, a partir del estudio de Ingeniería Básica elaborado por Rowe en 1996 (Ref. 4).
- Para el análisis pseudo-estático, se han considerado los coeficientes sísmicos representativos de los sismos de Diseño (SD) y Máximo Creíble (SMC).
- No se considera el aporte al nivel freático de la cubeta generado por precipitaciones y/o escorrentía. Para dar cumplimiento a esta condición, se debe asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de impermeabilización, canalización y desviación de aguas lluvias.
- Para el análisis se han considerado fallas globales, utilizando los perfiles central del tranque (P1) y transversal al muro lateral (P2), abarcando así, la estabilidad de ambos muros.
- Se asume un nivel freático superficial en la cubeta de lamas del depósito, mientras que en los muros principal y lateral, se considera una pared impermeable en la interfaz muro-lamas.

4.3.2.1. Aceleración máxima

De acuerdo al Estudio de Riesgo Sísmico, realizado por Riddell en 2015 (Ref. 8), los niveles de amenaza sísmica de interés, corresponden: al Sismo de Diseño, asociado a una probabilidad de excedencia (P_e) de 10% en 50 años, con un periodo de retorno medio (T) de 475 años; y el Sismo Máximo Creíble, en que P_e es de 10% en 500 años, con un periodo de retorno medio (T) equivalente a 949 años.

Los valores medios de la aceleración horizontal máxima (A = PGA en unidades de g) propuestos para dichos niveles, se resumen a continuación en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Valores de aceleración horizontal máxima en unidades de g, para los sismos SMC y SD (Fuente: Ref. 8).

PGA (g)	
Sismo de Diseño (g)	**Sismo Máximo Creíble (g)**
0.471	0.691

Según el mismo documento (Ref. 8), el valor de aceleración horizontal máxima para el Sismo de Diseño (0.471g), es comparable al que entregan las normas de diseño de edificios y estructuras industriales (NCh 433 y NCh 2369 respectivamente). Esto pues, si se compara con el valor de aceleración de ambas normas, para el área de emplazamiento del tranque (zona sísmica 3) se obtiene un valor de 0.4g (Ver Tabla 4.2), el cual es un 15% menor respecto al valor probabilístico entregado por el estudio de Riddell (Ref. 8).

Tabla 4.2 Coeficiente máximo efectivo de aceleración (Fuente: Ref. 6).

Zona Sísmica	A'_0
1	0.2
2	0.3
3 (zona de emplazamiento del tranque El Gato).	0.4

Respecto al valor obtenido para representar el Sismo Máximo Creíble (Tabla 4.1), el mismo autor reconoce que este escenario representa al más crítico, pues corresponde al *"evento máximo razonablemente concebible de ocurrir en una fuente sísmica a la distancia más corta al sitio en estudio"*.

4.3.2.2. Coeficiente sísmico horizontal

De acuerdo a la clasificación de embalses, presentada en el D. S. MOP N° 50/2015, el tranque de relaves El Gato, corresponde a un embalse tipo C *("grandes, de altura máxima de muro igual o superior a 30 m, o bien de capacidad igual o superior a 60.000.000 m^3").*

Con respecto al diseño estructural de los embalses, el artículo 31, letra b del mismo documento (Ref. 2), exige que los análisis de estabilidad mínimos para los embalses de categoría C, deban considerar los casos estático y dinámico para los sismos Máximo Creíble y de Diseño.

Según lo presentado en Ref. 7, en la práctica chilena, para el análisis de estabilidad de presas de relaves, la componente vertical de las aceleraciones de un sismo, es normalmente despreciada, siendo entonces, el sismo representado como una fuerza horizontal que en este caso, afecta a todo el modelo.

De acuerdo a Ref. 7, en la práctica nacional, el coeficiente sísmico horizontal "k_h" ha sido calculado mediante dos métodos. El primero de ellos, corresponde a la expresión de Saragoni (1993), quien, basado en el artículo de Noda y Uwave (1976), enfocado a estimar la relación entre el coeficiente sísmico y la aceleración del suelo en muros gravitacionales de molos, adecuó estos avances de acuerdo al comportamiento de los sismos chilenos. Para ello, Saragoni desarrolló las siguientes expresiones:

$$k_h = \left\{0.3\frac{a_{max}}{g}; a_{máx} \leq 0.67g\right\} \text{ ó } \left\{0.2(\frac{a_{max}}{g})^{0.2};\ a_{máx} > 0.67g\right\}$$

Donde $a_{máx}$ representa la aceleración horizontal máxima (PGA) del sismo.

El segundo método es presentado en el Manual de Carreteras (2016), el cual aplica solamente cuando no existe un estudio sismológico específico para la zona de interés, que permita estimar con exactitud el valor de $a_{máx}$.

En este caso, como el sector de emplazamiento del tranque cuenta con un Estudio de Riesgo Sísmico (Ref. 8), es posible identificar las aceleraciones máximas que se generarían (presentadas anteriormente en la Tabla 4.1).

Por lo tanto, para este caso resulta válido aplicar las relaciones de atenuación propuestas por Ruiz S. y Saragoni R. (1993).

A partir de ello, a continuación, en la Tabla 4.3 se muestran los valores de coeficiente sísmico horizontal obtenidos mediante dichas relaciones, para los sismos Máximo Creíble y de Diseño.

Tabla 4.3 Coeficientes sísmicos horizontales asociados a cada sismo en estudio, según las relaciones de atenuación de Ruiz y Saragoni (1993).

Coeficiente Sísmico	Sismo de Diseño	Sismo Máximo Creíble
k_h	0.15	0.19

Finalmente, dado lo anterior, y con el objeto de responder a los requerimientos del D. S. MOP N° 50/2015 de la DGA, en el análisis de estabilidad pseudo-estático se utilizarán los valores de coeficiente sísmico horizontal k_h descritos en la Tabla 4.3 para los sismos de Diseño y Máximo Creíble (k_h = **0.15** y **0.19** respectivamente).

4.3.3. Método de Cálculo Adoptado

Tal como es mencionado en secciones anteriores, actualmente, uno de los métodos de análisis de estabilidad de taludes más empleado, es el Método de Equilibrio Límite (MEL), donde los parámetros resistentes de los suelos corresponden a estados últimos de resistencia. Estos procedimientos geotécnicos clásicos son aceptados tanto por la práctica nacional como internacional.

Para evaluar la estabilidad de taludes se utilizó el método de equilibrio plástico-límite bidimensional de Morgenstern-Price, bajo condiciones estáticas y sísmicas (que incluye análisis pseudo–estáticos), en los perfiles seleccionados a partir de la configuración geométrica actual.

4.3.4. Factores de Seguridad Considerados

De acuerdo al artículo 31, letra b) del D. S. MOP N° 50/2015 (Ref. 2), para embalses de categoría C, en la verificación de estabilidad de los muros se deben obtener factores de seguridad mínimos según:

- Caso estático : $FS_e \geq 1.4$
- Caso pseudo-estático : $FS_{p\text{-}e} \geq 1.2$

Además, en el mismo artículo, la DGA establece que para condiciones post-sísmicas, referidas al sismo Máximo Creíble, el FS mínimo exigido será de FS > 1.0. Sin embargo, dicho análisis y sus conclusiones, se presentan en el Informe de Análisis de Estabilidad Dinámica (Ref. 1), donde se confirma la estabilidad de la presa en el escenario post-sismo.

A partir de lo establecido en el D. S. MOP N° 50/2015 (letra b, artículo 31), en condiciones pseudo-estáticas, el valor considerado (≥ 1.2) es levemente superior a la unidad. Por lo tanto, es esperable que cada vez que la aceleración máxima generada por un sismo que implique un k_h superior al seleccionado, se generen fallas intermitentes que faciliten la generación de desplazamientos en los taludes estudiados.

4.3.5. Parámetros Geotécnicos considerados

Para la representación del suelo natural, se han considerado los resultados de las campañas anteriores, descritas en el Informe Geotécnico del tranque El Gato (Ref. 5).

A partir de lo descrito en ese documento (Ref. 5), se han considerado 3 horizontes: el primero de ellos corresponde al material superficial compuesto de bloques y gravas arenosas de compacidad media; el segundo corresponde a arenas y gravas limosas de compacidad media a alta; y el tercero corresponde a roca basal de buena calidad.

En la Tabla 4.4 se entregan los parámetros asociados a cada material involucrado en la estabilidad del depósito.

Tabla 4.4 Parámetros geotécnicos utilizados en la modelación.

Nombre		**γ (t/m^3)**	**ϕ (°)**	**c (kPa)**
Suelo de Fundación	Hor.I	1.9	34	10
	Hor. II	2.1	38	
	Hor. III	2.75	-	-
Material de Empréstito		1.9	38	0
Arenas de Relave		1.9	32	0
Lamas de Relave		1.74	32	0.08

Tal como se describe en el Informe Geotécnico del tranque El Gato (Ref. 5), los criterios de selección de los parámetros geotécnicos se basan tanto en los resultados de campañas y prospecciones anteriores, como en la amplia experiencia de esta consultora.

4.3.6. Perfiles Geométricos utilizados

Para el análisis de estabilidad se han escogido 2 perfiles representativos, los que corresponden al perfil central del muro principal (P1) y el perfil transversal al muro lateral (P2). La ubicación de dichos perfiles se muestra a continuación en la Figura 4.1.

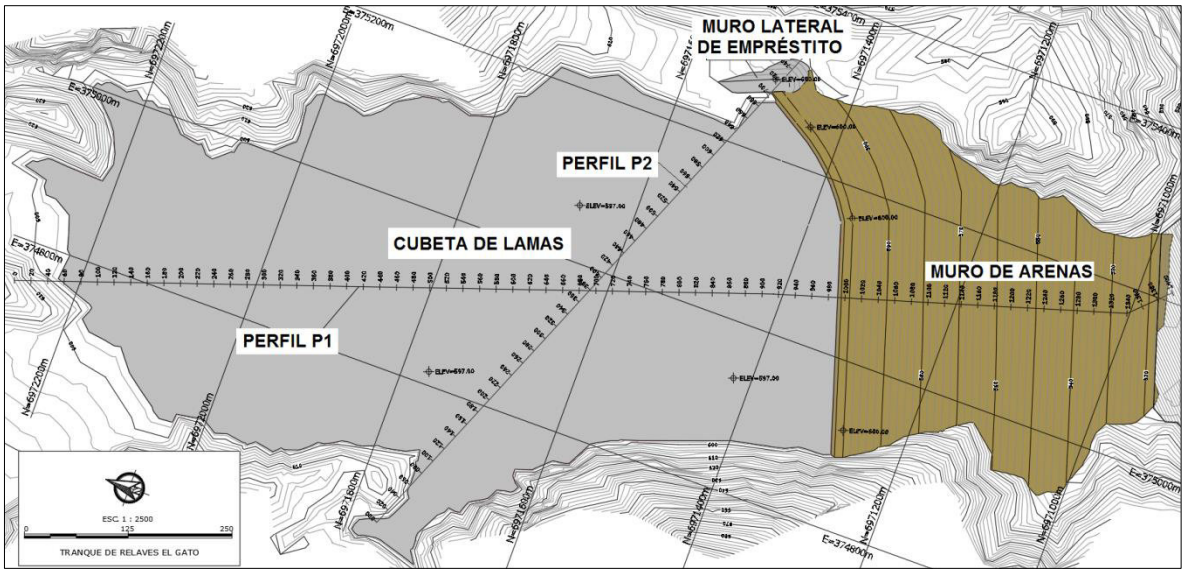

Figura 4.1 Ubicación de los perfiles P1 (eje central, muro principal) y P2 (muro lateral), Tranque de Relaves El Gato.

A continuación en la Figura 4.2 y Figura 4.3 se muestra el detalle y características de los perfiles P1 y P2 respectivamente.

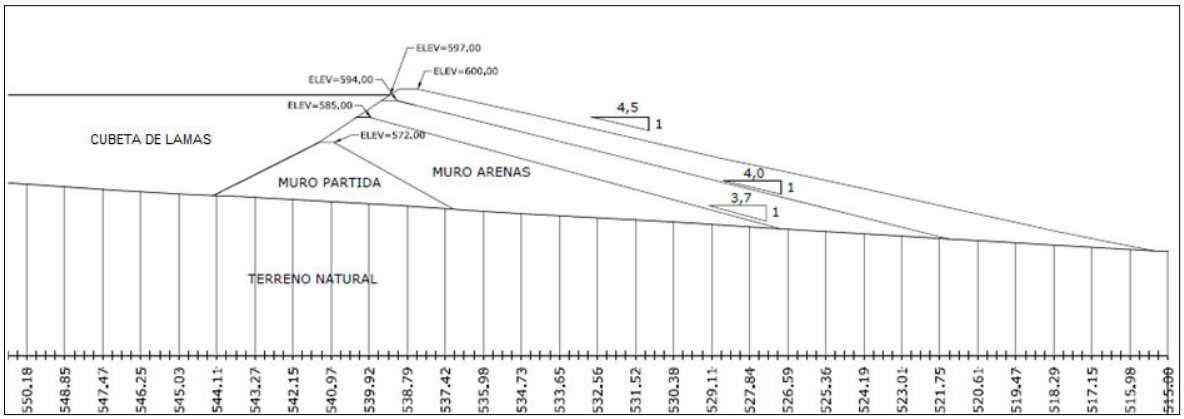

Figura 4.2 Detalle perfil P1, Tranque de Relaves El Gato.

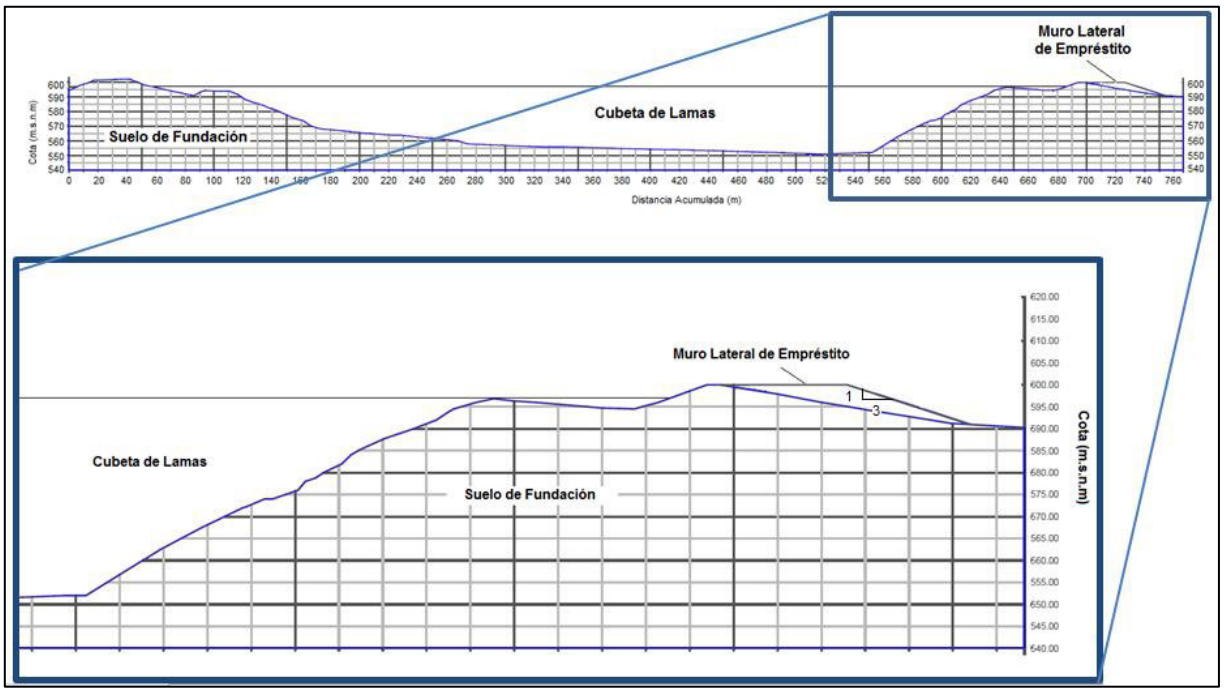

Figura 4.3 Detalle perfil P2, Tranque de Relaves El Gato.

El perfil del eje central P1 mostrado en la Figura 4.2 representa el sector característico de la quebrada principal donde se emplaza el tranque en estudio. A su vez, el perfil P2 (Figura 4.3), permite representar la geometría del perfil de relleno lateral en relación con la cubeta de lamas.

4.3.7. Modelos considerados

A continuación, en la Figura 4.4 se muestran las características geométricas y consideraciones adoptadas para modelar el perfil P1 en estudio.

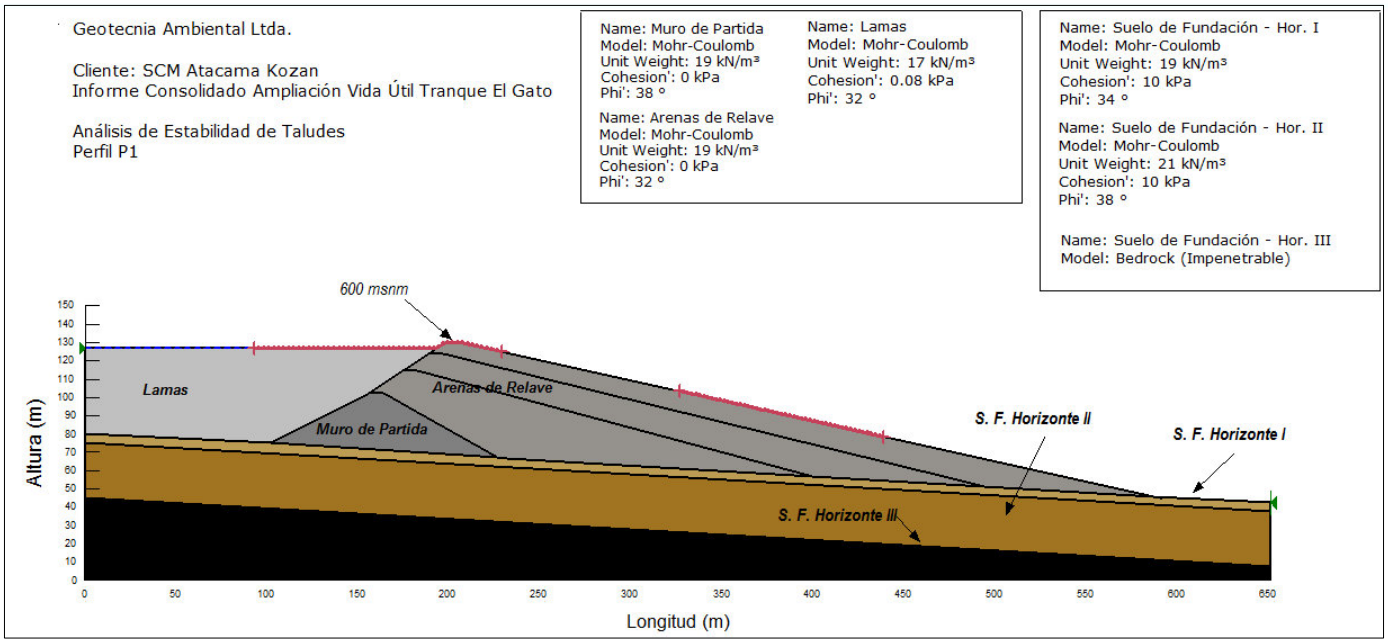

Figura 4.4 Características del modelo perfil P1, Tranque de Relaves El Gato.

Tal como se aprecia en la figura anterior (Figura 4.4), se ha considerado que el muro principal ha alcanzado su cota de crecimiento máxima de diseño, la cual equivale a los 600 msnm, según la Resolución Exenta N° 0218 del Sernageomin (Ref. 10). Esta situación representa la condición de almacenamiento máximo que pueda tener el tranque, por lo que implica la mayor cantidad de material involucrado en la estabilidad (escenario más desfavorable). La pendiente del muro principal utilizada en el modelo, corresponde a la pendiente aprobada por diseño (Ref. 10), equivalente a V:H = 1:4.5.

Con respecto al nivel freático considerado, de acuerdo a los datos suministrados por el cliente (AK), no existe un nivel registrado al interior del tranque, por lo que en el modelo se ha dispuesto que tanto el muro de partida como el muro de arenas de relave se encuentran totalmente secos. No así, el caso de las lamas, que se asumen completamente saturadas.

Por otra parte, de acuerdo a los antecedentes estratigráficos del suelo de fundación que se han podido recabar, y que son presentados en detalle en el Informe Geotécnico (Ref. 5), es posible considerar 3 horizontes, donde cada uno presenta un espesor constante de manera de simplificar el modelo. Esto se justifica además, porque para efectos de la modelación, y con base en lo solicitado por la autoridad, el análisis de estabilidad se centra en el sector de los muros principal y lateral, descartando así, una falla del suelo de fundación.

En relación con la materialización del muro principal, se ha considerado una primera fase de construcción del muro de partida, el cual, a diferencia de las arenas de relave que han sido utilizadas para el crecimiento del mismo muro, presenta una componente friccionante mayor.

A continuación en la Figura 4.5 se muestran las características del perfil P2, el cual permite la evaluación de la estabilidad del muro lateral, y acorde a los antecedentes enviados por el mandante (AK), ha sido confeccionado de material de empréstito.

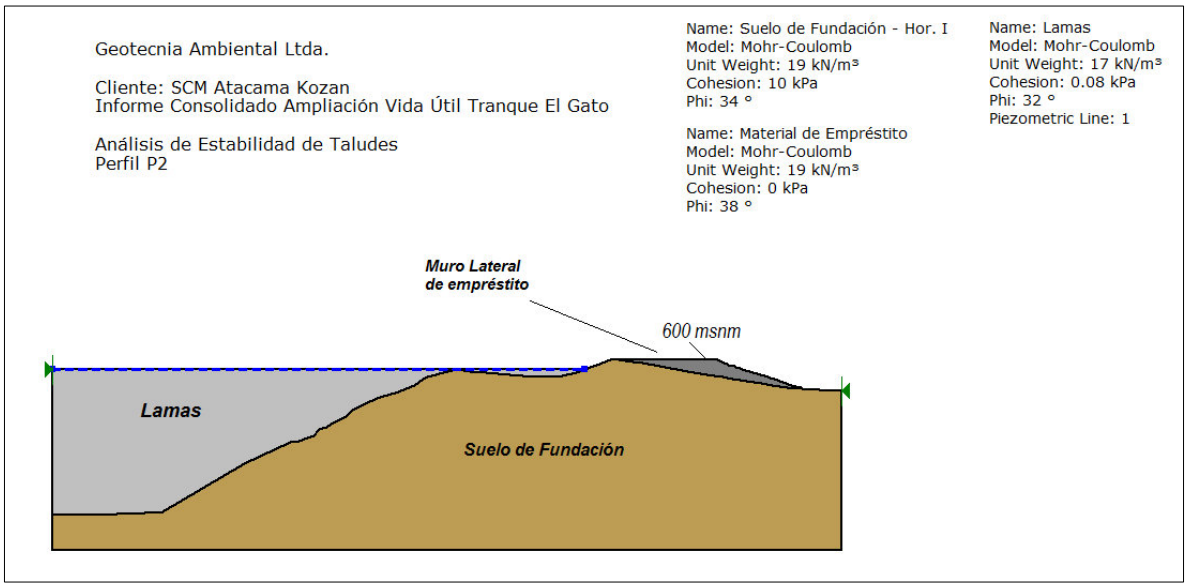

Figura 4.5 Características del modelo perfil P2, Tranque de Relaves El Gato.

Tal como se aprecia en la figura anterior (Figura 4.5), en el modelo del perfil P2 se considera que el suelo de fundación está constituido por un material homogéneo de baja resistencia, acorde a las características de los materiales encontrados en campañas anteriores (Ver Ref. 5).

Al igual que el modelo del perfil P1 donde se presenta el muro principal, se ha considerado que el muro lateral alcanza su altura máxima permitida por diseño (600 m. s. n. m), manteniendo una pendiente de V:H = 1:3.

Por otra parte, al igual que el modelo del perfil P1, se considera que la presencia del nivel freático afecta solamente al material constituido por las lamas de la cubeta, suponiendo así, que tanto el drenaje basal del tranque como el nivel de impermeabilización de los muros, es 100% efectivo.

El rango de superficies de falla más probable para ambos casos, ha sido asignado en ambos modelos, al sector de los muros en estudio.

4.3.8. Resultados obtenidos

En el presente capítulo se presentan los resultados gráficos del análisis de estabilidad, obtenidos para cada caso en estudio.

4.3.8.1. Resultados del Análisis, Caso Estático

A continuación en la Figura 4.6 y Figura 4.7, se presentan los resultados obtenidos (factores de seguridad y superficie de falla más probable) para el análisis estático de los modelos representativos de los perfiles P1 y P2.

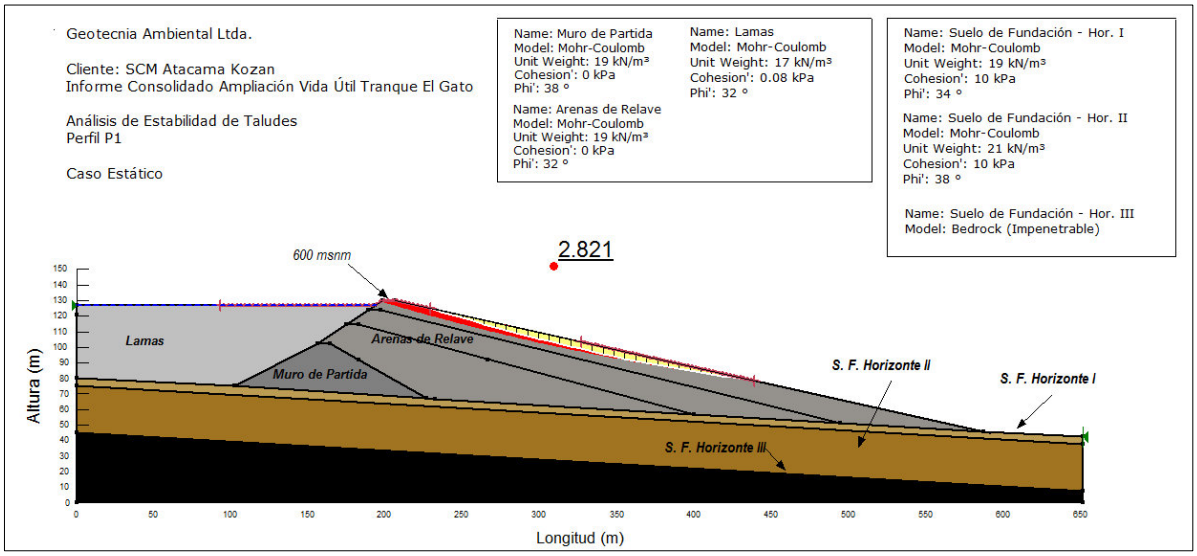

Figura 4.6 Factor de seguridad estático y superficie de falla más probable muro principal (perfil P1), tranque de relaves El Gato.

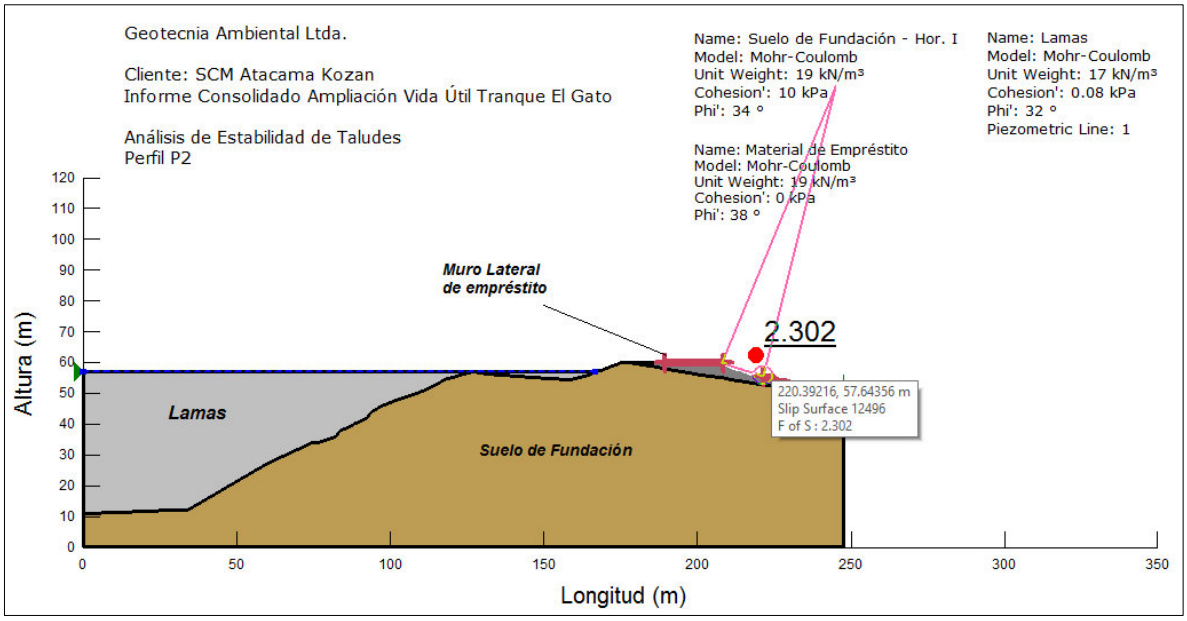

Figura 4.7 Factor de seguridad estático y superficie de falla más probable muro lateral (perfil P2), tranque de relaves El Gato.

Tal como se aprecia en las figuras anteriores (Figura 4.6 y Figura 4.7), los valores obtenidos para el factor de seguridad estático de ambos muros (muro principal y lateral), superan ampliamente lo solicitado por la autoridad (ver sección 4.3.4), garantizando así la estabilidad estática del depósito para los perfiles y supuestos considerados.

4.3.8.2. Resultados Análisis Pseudo-Estático

Con respecto a los resultados obtenidos para el análisis pseudo-estático, a continuación en la Figura 4.8 a la Figura 4.11, se muestran los FS obtenidos luego de aplicar los coeficientes sísmicos horizontales representativos de los sismos de Diseño y Máximo Creíble (según letra b, artículo 31 del D. S. MOP N° 50/2015, Ref. 2).

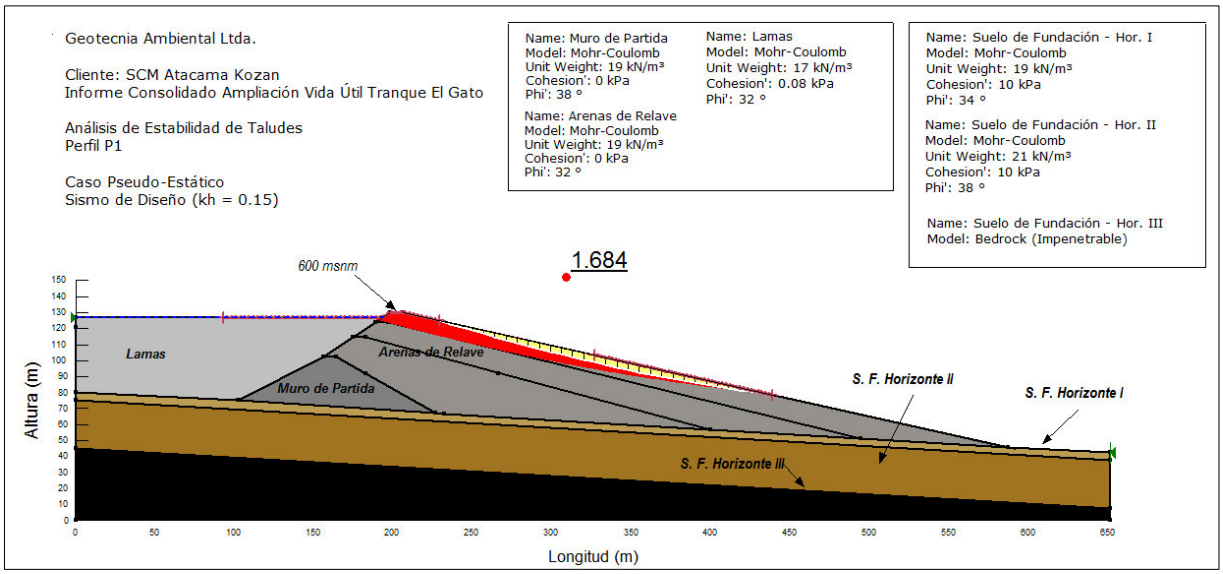

Figura 4.8 Factor de seguridad pseudo-estático y superficie de falla más probable muro principal (perfil P1), sismo de Diseño (k_h = 0.15).

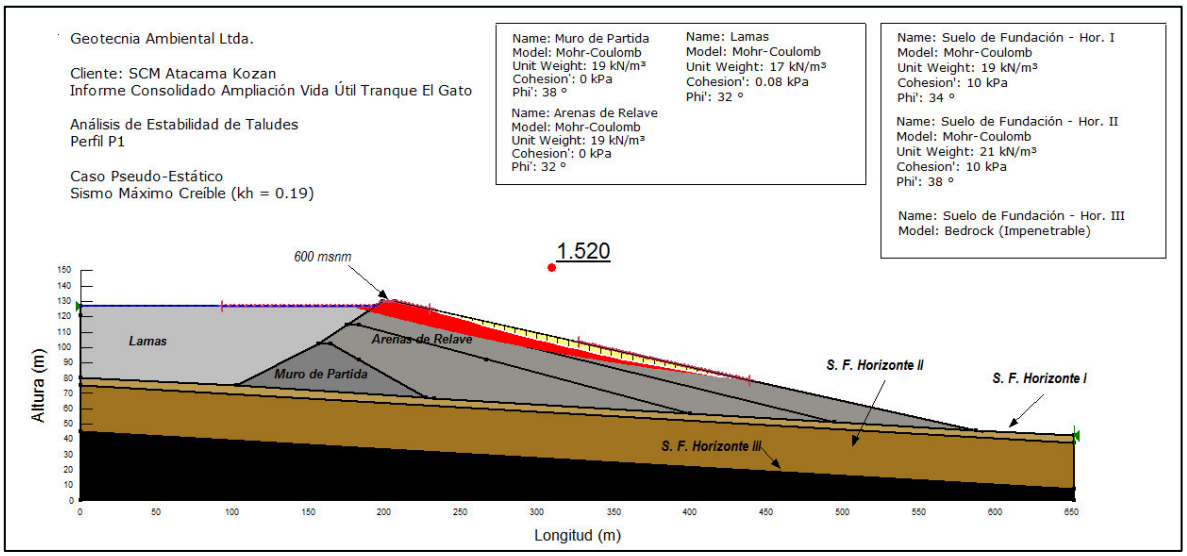

Figura 4.9 Factor de seguridad pseudo-estático y superficie de falla más probable muro principal (perfil P1), sismo Máximo Creíble (k_h = 0.19).

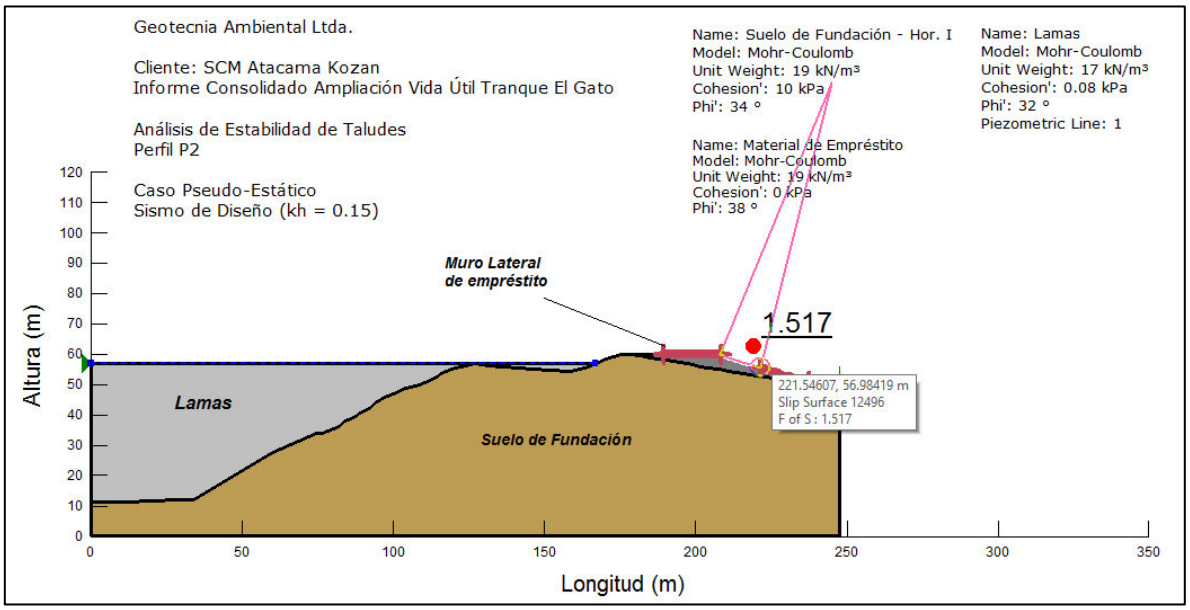

Figura 4.10 Factor de seguridad pseudo-estático y superficie de falla más probable muro lateral (perfil P2), sismo de Diseño (k_h = 0.15).

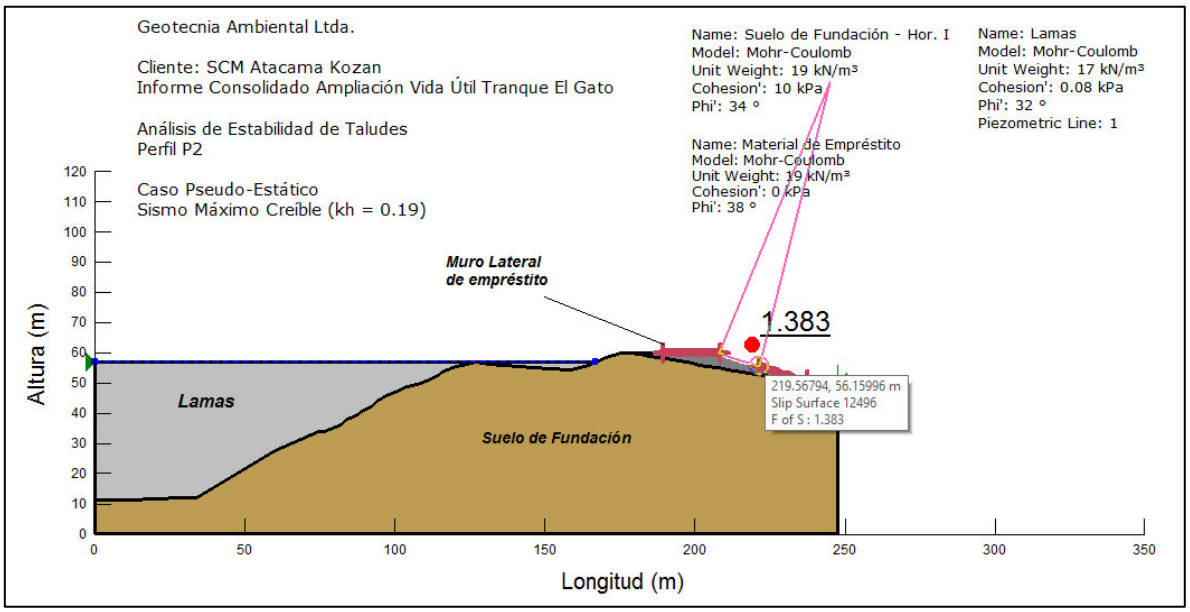

Figura 4.11 Factor de seguridad pseudo-estático y superficie de falla más probable muro lateral (perfil P2), sismo Máximo Creíble (k_h = 0.19).

Acorde a los resultados mostrados anteriormente, ambos modelos cumplen con lo exigido por la autoridad (ver sección 4.3.4), superando el valor del FS mínimo exigido (1.2) por el artículo 31 del D. S. MOP N° 50/2015 (Ref. 2), para los sismos de Diseño y Máximo Creíble.

Esto implica que si se genera un sismo en la zona de emplazamiento del tranque, que alcance un valor peak de aceleración horizontal menor o igual a los considerados en este documento (Ver Tabla 4.3), para los supuestos y perfiles considerados, se garantizaría que tanto las características geométricas como geotécnicas de las obras en estudio, no suponen un riesgo que pueda afectar la estabilidad del depósito.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este documento se han presentado los resultados obtenidos a partir de las modelaciones realizadas para analizar la estabilidad estática y pseudo-estática de los muros principal y lateral del tranque de relaves El Gato.

Dado el contexto de este trabajo, en el que prima una solicitud de permiso sectorial, los modelos utilizados han sido generados a partir de la geometría de diseño del tranque, asumiendo como parámetros resistentes, aquellos obtenidos de las campañas y prospecciones que se han realizado a lo largo de la vida útil del depósito.

A partir de los resultados obtenidos, se puede deducir que ambos muros (principal y lateral), para las condiciones y perfiles considerados, presentan una condición de estabilidad estática y pseudo-estática, con factores de seguridad superiores a los mínimos exigidos por la autoridad. En otras palabras, de acuerdo al artículo 31, letra b) del D. S. MOP N° 50/2015 (Ref. 2), para embalses de categoría C, en la verificación de estabilidad de los muros se deben obtener factores de seguridad mínimos según:

- Caso estático : $FS_e \geq 1.4$
- Caso pseudo-estático : $FS_{p\text{-}e} \geq 1.2$

Lo anterior, comparado a los resultados obtenidos (Tabla 5.1), permite deducir que incluso ante la ocurrencia del sismo Máximo Creíble (SMC) en la zona en estudio, bajo un análisis del tipo pseudo-estático, es poco probable que se genere una liberación de las lamas contenidas en el tranque.

Tabla 5.1 Resumen de factores de seguridad obtenidos para cada perfil.

Perfil	**Muro**	**FS estático**	**FS pseudo-estático (SD)**	**FS pseudo-estático (SMC)**
P1	Principal	2.821	1.684	1.520
P2	Lateral	2.302	1.517	1.383
FS exigido		1.4	1.2	

Por lo tanto, las modelaciones realizadas confirman que el depósito es estable para una condición de crecimiento máximo (cota del muro 600 msnm), para todos los casos y criterios analizados.