



Coyhaique, 27 de abril de 2017.

CARTA N°021/2017.

Señor
Osvaldo Gallardo Mundaca.
Inspector Técnico del Servicio.
Dep. Gestión Medioambiente y Servicios.
Ilustre Municipalidad de Coyhaique
Presente

*Ref. Reingreso Estudio Estabilidad de
Taludes CEMARC.*

De nuestra consideración

A través de la presente carta hacemos llegar a usted "Informe Geotécnico de Estabilidad de Taludes proyecto CEMARC", escenario actual, en concordancia con el cuerpo normativo vigente, "Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios, Artículo N°15 y que fuera solicitado con anterioridad.

Sin otro particular, se despide cordialmente de Ud.

Felipe Oyarzun Bagioli
Subgerente de Operaciones
Residuos Sólidos Coyhaique Ltda.

C.c.: Archivo Proyecto CEMARC

TITULO DEL DOCUMENTO

"INFORME ESTABILIDAD RELLENO SANITARIO
COYHAIQUE-CEMARC



ELABORADO

Michael
Michael Santander T.
Ingeniero Civil
Universidad de Chile

Diciembre-2016

INDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION.....	3
2.	ALCANCE Y OBJETIVO DEL ESTUDIO GEOTECNICO.....	3
3.	ANTECEDENTES.....	3
4.	ANTECEDENTES GENERALES DEL RELLENO.....	4
4.1	UBICACION Y ACCESOS.....	4
4.2	CARACTERISTICAS DEL RELLENO SANITARIO.....	4
4.3	ASPECTOS GEOTECNICOS EN LA ESTABILIDAD DEL RELLENO.....	4
5.	CARACTERIZACION GEOTECNICA DEL RELLENO.....	6
6.	CARACTERIZACION GEOTECNICA DEL SUELO DE FUNDACION.....	8
7.	TOPOGRAFIA RELLENO SANITARIO.....	10
8.	ASPECTOS DE SISMICIDAD Y RIESGO SISMICO.....	11
8.1.	INTRODUCCION.....	11
8.2.	CONCEPTO DE RIESGO SISMICO.....	11
8.3.	COEFICIENTE DE ACELERACION SISMICA.....	11
8.3.1.	Coeficiente Sísmico Norma Chilena 433.....	12
8.3.2.	Coeficiente Sísmico del Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica de Chile.....	13
9.	NIVEL FREATICO EN EL RELLENO.....	16
10.	METODO DE ANALISIS DE ESTABILIDAD.....	17
10.1.	INTRODUCCION.....	17
10.2.	METODO DE ANALISIS DE ESTABILIDAD.....	17
10.3.	CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD.....	18
10.4.	PROCEDIMIENTO DE ANALISIS.....	18
11.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	20
12.	REFERENCIAS & BIBLIOGRAFIA.....	21
13.	ANEXO GRAFICOS DE RESULTADOS.....	23

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de Cohesión y ángulo de fricción residuos solidos.....	7
Tabla 2: Valores de Cohesión y ángulo adoptados para el Relleno Sanitario.....	7
Tabla 3: Valores de Cohesión y ángulo adoptados para el Suelo de Fundación.....	8
Tabla 4: Zonas Sísmicas Chilena.....	13
Tabla 5: Resumen Factores de Seguridad Relleno.....	19

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico del análisis de los parámetros de resistencia al corte de residuos sólidos.....	6
Figura 2: Resultados Análisis Suelo de fundación Relleno Sanitario.....	8
Figura 3: Topografía Relleno Sanitario CEMARC Diciembre 2016.....	10
Figura 4: Ubicación Relleno Zona Sísmica Chilena.....	12
Figura 5: Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica.....	14
Figura 6: Ubicación Relleno Sanitario CEMARC en Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica.....	14
Figura 7: Coeficiente Sísmico Saragoni 1993.....	15
Figura 8: Nivel Freático Talud Hoek & Bray.....	16

1. INTRODUCCION.

El presente documento corresponde al Informe de Estabilidad del Relleno Sanitario denominado Centro de Manejo de Residuos Coyhaique (CEMARC), ubicado A 10 Km al noreste de la ciudad de Coyhaique, por la ruta X-55 que conduce a Coyhaique Alto, Región de Aysén.

Este estudio se ha fundamentado en la evaluación e integración de toda la información disponible, y ha considerado todos los aspectos que se deben considerar en la evaluación de la estabilidad geotécnica de los taludes de los depósitos artificiales masivos, y en particular, la de los taludes de los depósitos de residuos sólidos urbanos, según los estándares nacionales e internacionales que han sido sugeridos para tal efecto.

2. ALCANCE Y OBJETIVO DEL ESTUDIO GEOTECNICO.

Tal como se ha indicado, el principal objetivo de este estudio geotécnico es evaluar la estabilidad mecánica de los taludes del Relleno Sanitario denominado Centro de Manejo de Residuos Coyhaique (CEMARC), exclusivamente en base a la información a portada por CERMARC, topografía ,características del suelo de fundación , materiales que conforman el relleno y volumen depositado.

No incluye el análisis geológico del sector, ante presencia de falla regional y/o local que pueden afectar el lugar de emplazamiento del relleno.

3. ANTECEDENTES.

Para el desarrollo de este Informe se definió como antecedentes los siguientes documentos:

- Estudio de Impacto Ambiental EIA_6223_Descripcion del Proyecto, Ingeniería Alemana.
- Estudio de Impacto Ambiental EIA_6223_Resumen Ejecutivo, Ingeniería Alemana.
- Estudio de Impacto Ambiental EIA_6223_Anexos, Ingeniería Alemana.
- Plano Control Relleno_2016-09-30_rev00Lamina 1 de 4, Septiembre de 2016, RESCO.
- Plano Control Relleno_2016-09-30_rev00Lamina 2 de 4, Septiembre de 2016, RESCO.
- Plano Control Relleno_2016-09-30_rev00Lamina 3 de 4, Septiembre de 2016, RESCO.
- Plano Control Relleno_2016-09-30_rev00Lamina 4 de 4, Septiembre de 2016, RESCO.
- Topografía con el Diseño del Relleno a Septiembre de 2016.

4. ANTECEDENTES GENERALES DEL RELLENO.

4.1 UBICACION Y ACCESOS.

El Relleno Sanitario denominado Centro de Manejo de Residuos Coyhaique (CEMARCO), está ubicado a 10 Km al noreste de la ciudad de Coyhaique, por la ruta X-55 que conduce a Coyhaique Alto, Región de Aysén.

El predio en donde se ubica el relleno sanitario, que es de la Municipalidad de Coyhaique, tiene una superficie total de ± 45 Há, y de la superficie total del predio 21 Has corresponde al Relleno.

4.2 CARACTERISTICAS DEL RELLENO SANITARIO.

El Relleno de Coyhaique comenzó a operar en el año 2004, hasta septiembre de 2016 se han dispuesto 124.944, recibiendo una tasa media anual de 19.500 ton compuestas en un 50 % de materia orgánica.

El proyecto tiene una capacidad global de 729.000 m³ incluyendo el material de cobertura para operar por un periodo de 30 años. La pendiente de diseño del relleno varía entre 31° a 39°.

4.3 ASPECTOS GEOTECNICOS EN LA ESTABILIDAD DEL RELLENO.

Como se ha indicado, aunque los residuos sólidos domiciliarios no son materiales que presenten las características propias de un material geotécnico, la caracterización de su comportamiento a la estabilidad normalmente se realiza en base a los principios y las técnicas que son propias de la geotecnia convencional, lo cual, ha resultado satisfactoriamente adecuado.

De acuerdo a la información disponible en la literatura técnica especializada, y en nuestra propia experiencia, los factores identificados que inciden en la estabilidad de los taludes de los rellenos domiciliarios, son los siguientes.

- Geometría del Talud.

Este factor tiene directa relación con la altura y ángulo del talud, junto con la resistencia mecánica al corte del material que lo conforma y la condición de carga en el talud, y tiene una especial importancia en el diseño geométrico estable de los taludes de los rellenos. A mayor altura de talud global menor debe ser su ángulo de talud, y viceversa.

- **Resistencia al Corte de los Materiales.**

La resistencia al corte del material que conforma el relleno, y en la interface de los diferentes tipos de materiales, tiene gran importancia en la generación de superficies de deslizamientos y la falla de un talud, por lo cual, se debe identificar el mecanismo de falla más probable del relleno a fin de poder prevenirla.

- **Condiciones de Carga.**

El peso propio del relleno, y cualquier otra carga externa aplicada, son factores que afectan la condición de esfuerzos en el relleno sanitario, y por ende, afectan su estabilidad. El aumento de la altura de un relleno incrementa el esfuerzo de corte en las potenciales superficies de falla, sobre el residuo existente, los sellos, y los materiales de base.

- **Presiones Intersticiales.**

Un excesivo nivel, o incremento, de la presión intersticial dentro de un relleno puede tener un efecto negativo en su estabilidad y, por ende, una disminución de la presión intersticial (presión de agua) tiende a mejorar dicha estabilidad.

La estabilidad del relleno puede ser afectada por este factor sin un adecuado control de aspectos tales como: los residuos líquidos, las infiltraciones de agua superficial, la recirculación de líquidos en el relleno, y el inadecuado drenaje de los líquidos lixiviados (percolados).

- **Asentamientos del Material.**

Excesivos asentamientos del relleno pueden desestabilizar, o agregar factores desestabilizantes al relleno. Los asentamientos localizados y puntos bajos en la superficie del relleno (depresiones localizadas) facilitan la acumulación e infiltración del agua superficial en el relleno, con lo cual se incrementa la presión intersticial y el nivel piezométrico dentro de él.

- **Aspectos Operacionales.**

El grado de saturación, los sistemas de inyección de líquidos y aire, los sistemas de extracción de gas, la temperatura de los residuos, el nivel de los lixiviados en el relleno y la presión intersticial deben ser monitoreados para asegurar su estabilidad.

5. CARACTERIZACION GEOTECNICA DEL RELLENO.

De la vasta información geotécnica revisada, con respecto a la determinación de los parámetros geotécnicos de rellenos sanitarios.

En este estudio se realizó un análisis de la literatura especializada respecto a las propiedades geotécnicas de los rellenos de residuos sólidos urbanos, enfocado especialmente en experiencias con ensayos de corte directo para la determinación de los parámetros de resistencia al corte de estos residuos, con la intención de establecer valores razonables que permitan evaluar y diseñar en forma adecuada las futuras etapas del relleno sanitario CEMARC.

De la numerosa literatura revisada, se distinguen básicamente 3 tipos de fuentes de información: ensayos de corte directo en laboratorio, ensayos de corte directo a gran escala, retro-análisis de la información de ensayos de placa de carga, y retro-análisis de taludes que han permanecido estables ante un sismo severo.

También se consideró las experiencias obtenidas por Reinhart, et al. (ref. 2), en investigaciones sobre las propiedades geotécnicas de los rellenos sólidos urbanos. En estas investigaciones se determinó parámetros de resistencia al corte en base a los datos de ensayos de penetración in situ denominados CPT.

Dado que no se cuenta hasta el momento con la factibilidad de realizar ensayos de corte directo a gran escala directamente en el relleno sanitario, o la posibilidad de realizar retro-análisis a taludes que presenten reales procesos de falla, cuya geometría permita deducir los parámetros resistentes de la masa de residuos, se ha decidido adoptar un valor correspondiente al promedio estadístico de los datos empíricos propuestos en la literatura técnica especializada (ref. 2).

La Figura 1 indica el ajuste de una curva polinómica de segundo orden a todos los datos experimentales que se han considerado en el análisis estadístico indicado.

¡Error! No se pueden crear objetos modificando códigos de campo.

Figura 1: Gráfico del análisis de los parámetros de resistencia al corte de residuos sólidos

El resultado derivado del análisis estadístico de todos los datos experimentales presentados en el gráfico anterior indica la Tabla 1 para la cohesión c y ángulo de fricción Φ :

Tabla 1: Valores de Cohesión y ángulo de fricción residuos solidos

Variable	N	Rango	Mediana	Media	Desv. Estándar
Φ (°)	25	10,4 – 43	24,8	25,7	8,6
c (kPa)	25	0 – 83,1	19,5	22,4	22,1

Luego, del adecuado trabajo de síntesis de información realizado se han adoptado los parámetro para el relleno sanitario en este estudio de estabilidad indicado en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de Cohesión y ángulo adoptados para el Relleno Sanitario

Variable	Unidad	Valor Adoptado	Desviación estimada (\pm)	Fuente Considerada
Ang. de fricción (Φ)	Grados	25,0	3,6	Promedio de valores de la literatura.
Cohesión (c)	kPa	22,0	9,1	
Densidad (γ)	ton/m ³	1,20	0,1	PUCV (2006)

6. CARACTERIZACION GEOTECNICA DEL SUELO DE FUNDACION.

La caracterización del suelo de fundación se determinó a partir del Informe de Mecánica de Suelos realizado por Ingeniería Alemana S.A.

Según lo indicado en el Informe, el material sobre el cual se encuentra apoyado el Relleno, corresponde a un material arcilloso homogéneo, bandeado finamente y con cierto grado de compactación.

En el Informe citado se indica la ejecución de ensayos para este estrato, que corresponde a COY-C3, COY-C4 y COY-C9, indicados en la Figura 2.

Ensayo	NCh	COY-C1	COY-C3	COY-C4	COY-C5	COY-C8	COY-C9
Clasificación (USCS)		CL-ML	CL	CL-ML	CL-ML	CL-ML	CL
Peso específico bajo Malla 4	NCh 1532	2,62	2,66	2,68	2,66	2,64	2,64
Límite líquido	NCh 1517/I-79	25	41	26	20	20	25
Límite plástico	NCh 1517/II-78	20	21	19	14	14	16
Índice de plasticidad	NCh 1517/III-78	5	20	7	6	6	9
Densidad aparente (t/m ³)	NCh 1116-77	1,00	0,94	1,04	1,31	1,31	1,03
Humedad natural (%)	NCh 1515 Of.79	31,0	45,2	33,0	20,2	19,0	22,5
Contenido de materia Orgánica (%)							2,47
Densidad Máxima Proctor (t/m ³)	NCh 1534-II	-	-	1,72	-	1,87	1,81
Humedad óptima		-	-	10,9	-	12,1	15,4
Permeabilidad in situ (m/s)				1,71E-08		2,86E-08	
Permeabilidad laboratorio (m/s)				1,159x10 ⁻⁹			

Figura 2: Resultados Análisis Suelo de fundación Relleno Sanitario

A partir de los resultados de los ensayos y valores típicos para las arcillas obtenidos de la literatura se ha determinado utilizar los siguientes parámetros para el suelo de fundación indicados en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores de Cohesión y ángulo adoptados para el Suelo de Fundación

Propiedad	Valor
Cohesión ton/m ²	1
Densidad ton/m ³	1,4
Angulo de Fricción °	15°

7. TOPOGRAFIA RELLENO SANITARIO.

La topografía correspondiente a Diciembre de 2016 del el Relleno Sanitario, fue aportada por CEMARC y corresponde a la indicada en la Figura 3.

Cabe mencionar que la topografía enviada corresponde a la utilizada para generar los perfiles necesarios para el análisis de estabilidad, por lo que es de suma importancia que representa de buena manera a la situación actual relleno sanitario.

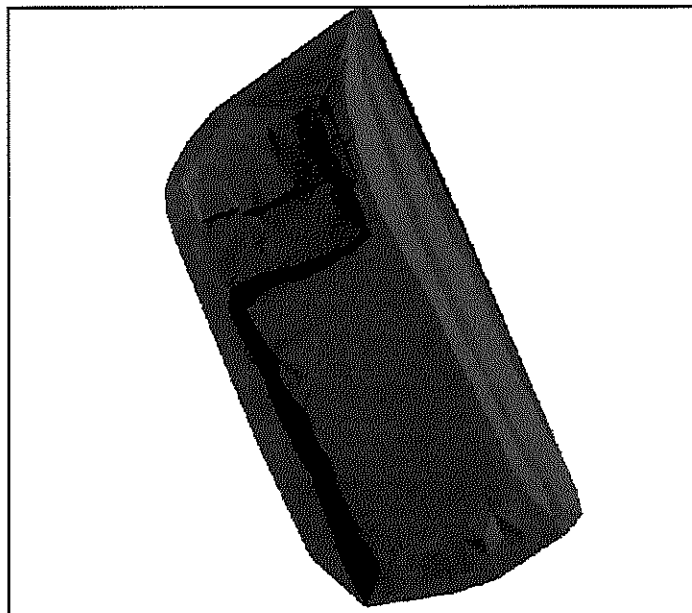


Figura 3: Topografía Relleno Sanitario CEMARC Diciembre 2016.

8. ASPECTOS DE SISMICIDAD Y RIESGO SISMICO.

8.1. INTRODUCCION

El presente capítulo contiene una evaluación de la sismicidad y del riesgo sísmico para la zona del relleno CEMARC, para estimar la aceleración horizontal máxima del terreno e incluirla en el análisis de estabilidad sísmica de los taludes mediante la tradicional formulación pseudo-dinámica del efecto de las sollicitaciones sísmicas.

8.2. CONCEPTO DE RIESGO SISMICO.

De acuerdo a la vasta experiencia que existe en relación al aspecto sísmico en la inestabilidad de obras civiles en regiones con gran actividad sísmica, como lo es nuestro país entre los 18° y 46° S, su diseño debe incluir el riesgo sísmico (diseño sismo-resistente).

Este concepto de riesgo sísmico normalmente es expresado como la probabilidad de que un cierto parámetro (aceleración) sea excedido en un cierto período, por ejemplo, un 10% de probabilidad de que un cierto valor de aceleración del terreno (0.20 g) sea excedido en ± 50 años.

Para analizar la estabilidad sísmica de los taludes del relleno, se adoptará la aceleración sísmica horizontal máxima como una medida de la intensidad del movimiento del terreno, aún cuando, tal aceleración sin ser un parámetro perfecto, o único, entrega una estimación razonable del probable riesgo sísmico en diversas situaciones prácticas, como es el caso bajo análisis.

8.3. COEFICIENTE DE ACELERACION SISMICA.

Un evento sísmico es un complejo fenómeno vibratorio que genera fuerzas inerciales de corta duración y variada naturaleza, por lo que la evaluación de sus reales efectos en la estabilidad de los taludes debería considerar un análisis dinámico, pero la alta complejidad teórica y analítica, y su alto costo, en muchos casos limita su aplicación, o no la justifica plenamente.

Para subsanar tal situación, en la práctica se adopta un método de análisis pseudo-dinámico que asume que el efecto dinámico de un evento sísmico real se puede asimilar a una fuerza inercial estática que actúa en contra de la estabilidad del talud (reduce el factor de seguridad). Esta fuerza se asimila a una aceleración sísmica horizontal α que induce la fuerza F_{ie} que actúa en el centro de gravedad del talud, es decir.

$$F_{ie} = \alpha W = AgW$$

- A = Coeficiente de aceleración sísmica
- g = Aceleración de la gravedad (980 cm/s²)
- α = Aceleración sísmica horizontal como fracción de g
- W = Peso total de la masa que desliza en el talud

La mayor dificultad para efectuar el análisis sísmico de la estabilidad de taludes con la formulación pseudo-dinámica de las fuerzas inerciales inducidas por un sismo, estriba en que no existe una metodología adecuada para determinar con certeza, y con una relativa simplicidad, el coeficiente de aceleración sísmica horizontal máxima utilizado en dicha formulación.

Por esta razón, es muy común en geotecnia adoptar un coeficiente sísmico según la experiencia, en base a reglas empíricas (0.10–0.15 en USA), o estimarlo de una macro zonificación sísmica como es la zonificación sísmica de la NCh 433 Of. 1996 Modificada el 2009 para el Diseño Sísmico de Edificios (ref. 13) y la NCh 2369 Of. 2003 para el Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales (ref.14).

8.3.1. Coeficiente Sísmico Norma Chilena 433

Según esta Norma Chilena, el Relleno CEMARC está ubicado en la Zona Sísmica 1 con una aceleración efectiva máxima del terreno (am_{áxima}) igual a 0.20 g, tal como se puede apreciar en la Figura 4.

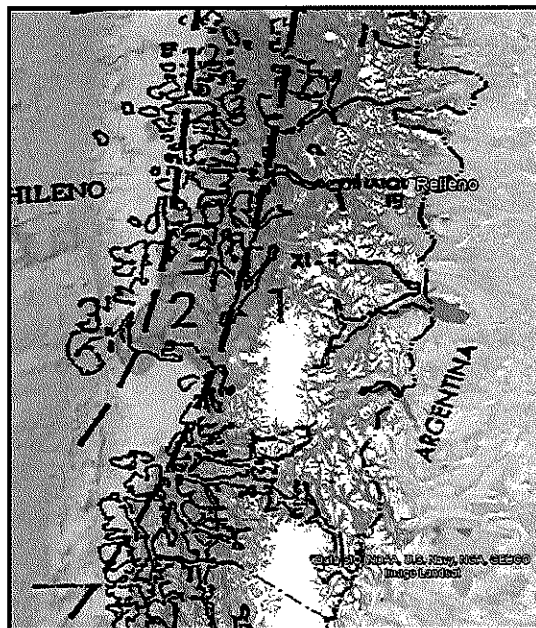


Figura 4: Ubicación Relleno Zona Sísmica Chilena

El Manual Chileno de Carreteras (2015) establece que:

$$k_h = 0.5A'_0$$

En donde A'_0 representa el coeficiente máximo efectivo de aceleración, el cual depende de la zona sísmica del país. Los valores de A'_0 varían desde 0.2 para la zona sísmica 1 hasta 0.4 para la zona sísmica 3.

Tabla 4: Zonas Sísmicas Chilena

Zona Sísmica	A_0
1	0,2
2	0,3
3	0,4

Debido a que el Relleno Sanitario se ubica en la Zona Sísmica 1($A_0=0,2$) , el coeficiente de aceleración sísmica corresponde a 0,1. Este método se aplica cuando no hay un estudio de peligro sísmico disponible para estimar el valor de a_{max} .

8.3.2. Coeficiente Sísmico del Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica de Chile.

Producto de los eventos sísmicos de gran magnitud ocurridos en nuestro país, tales como el de Cobquecura 2010 Magnitud 8,8(Mw); Iquique 2014 Magnitud 8,2(Mw); Canela Baja 2015 Magnitud 8,4(Mw), entre otros. La Asociación de Aseguradores de Chile A.G en conjunto con FME Engineering representa por Francisco Medina, desarrollaron un estudio con el objetivo de definir un nuevo Mapa Sísmico de Chile que permita incluir los eventos sísmicos de gran magnitud ocurridos en los últimos años.

El Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica, presenta la distribución continua (en lugar de zonificación) en el territorio nacional de la amenaza debido a la ocurrencia potencial de eventos sísmicos que afecten a Chile.

La amenaza sísmica, expresa en porcentaje (%) de la aceleración de gravedad, se calculó numéricamente a partir de modelos basados en principios sólidos de sismología, usando procedimientos científicos ampliamente aceptados.

En la Figura 5 se observan el mapa probabilístico de amenaza sísmica de Chile, indicando a través de las curva de isoaceleracion la aceleración máxima horizontal para un evento con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años (475 años de periodo de retorno), suponiendo condiciones de terreno con 900 m/s para la velocidad de onda de corte superficial.

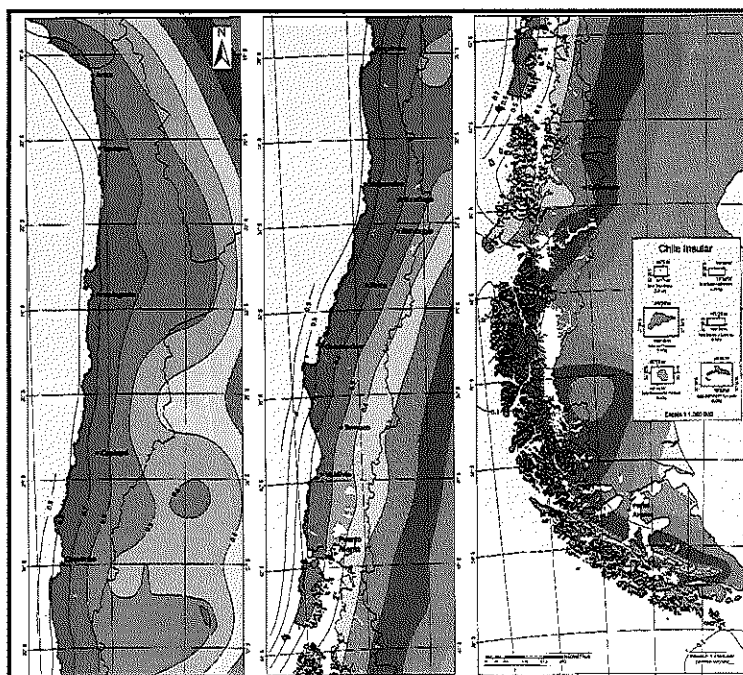


Figura 5: Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica

Para el caso del Relleno Sanitario CERMARC, la ubicación correspondiente al Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica de Chile, se indica en la Figura 6.



Figura 6: Ubicación Relleno Sanitario CERMARC en Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica.

El Relleno Sanitario se encuentra emplazada en la curva de isoaceleración máxima 0,3 recurriendo a la regla empírica ampliamente utilizada y aceptada en geotecnia, respecto a que el coeficiente de aceleración sísmica horizontal máxima equivale al 30% de la máxima aceleración del terreno (R. Saragoni, 1993 ver Figura 7), para la zona de la Cancha de Materia Prima en el Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica de Chile se tienen un coeficientes de aceleración sísmica horizontal máxima de 0,1.

$$k_s = \left\{ 0.3 \frac{a_{\max}}{g}; \quad a_{\max} \leq 0.67 g \right\} \text{ ó } \left\{ 0.2 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right)^{1.2}; \quad a_{\max} > 0.67 g \right\}$$

Figura 7: Coeficiente Sísmico Saragoni 1993

Sin embargo debido a la importancia del proyecto se utilizara un coeficiente sísmico 0,15.

Es importante destacar que lo anterior corresponde solo a una estimación. En caso de requerir valores reales, se debe efectuar un estudio de riesgo sísmico específico para el sitio de estudio.

9. NIVEL FREÁTICO EN EL RELLENO.

Con el objetivo de realizar un análisis completo de la estabilidad DEL Relleno Sanitario, se ha considerado incluir el nivel freático, debido a las características pluviométricas de la zona y a la generación propia de lixiviados de un relleno sanitario.

Una excesiva presión de agua en un talud genera un negativo efecto en su estabilidad al reducir la resistencia al corte del material (concepto de esfuerzos efectivos). Por lo cual, se ha considerado en este análisis la inclusión de un nivel freático asociado a un talud con una saturación moderada-baja, dado por el modelo N° 2 de Hoek & Bray. Cabe señalar que estamos en presencia de un nivel freático normal.

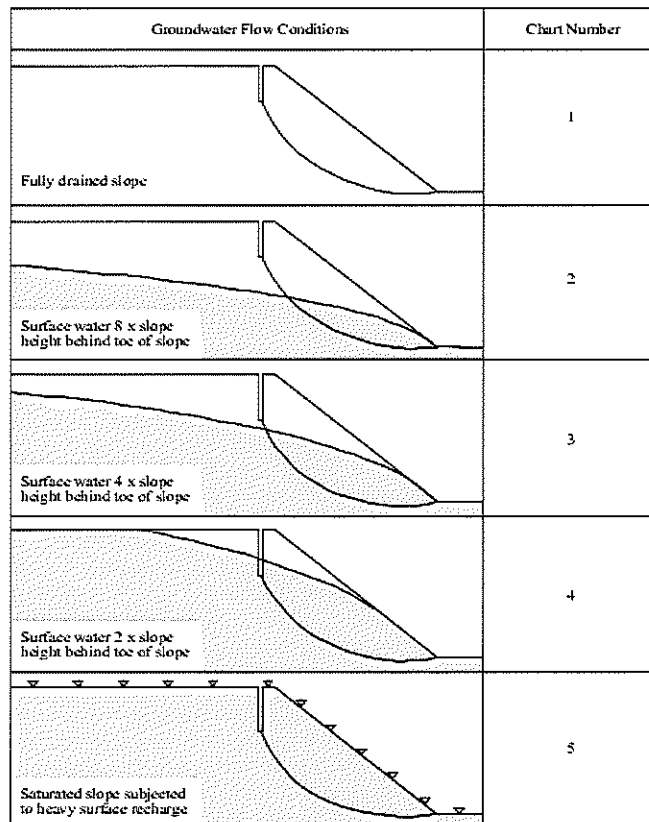


Figura 8: Nivel Freático Talud Hoek & Bray.

10. METODO DE ANALISIS DE ESTABILIDAD.

10.1. INTRODUCCION.

La vasta experiencia que existe respecto al comportamiento a la falla de los taludes de depósitos masivos conformados por materiales granulares tipo suelos, establece una clara relación entre las características del material y su comportamiento a la falla, como también es el caso de los taludes de los rellenos sanitarios conformados por residuos sólidos urbanos, los cuales exhiben un modo de falla muy similar al de un material tipo suelo, caracterizado por el deslizamiento a través de una superficie de falla circular o curvilínea y una mecánica de fallamiento de tipo rotacional.

Las superficies de deslizamiento que se originan en los taludes del relleno pueden experimentar el desplazamiento progresivo de una masa de residuos y generar un agrietamiento que facilitaría el ingreso de agua superficial hacia el relleno, lo cual incrementaría el desplazamiento disminuyendo la estabilidad de la masa de residuos por efecto de la presión de agua generada.

En otros casos, se pueden producir deslizamientos por un gran aumento del peso del relleno por efecto de su crecimiento en altura, o desarrollo de un alto nivel freáticos en el relleno.

Los deslizamientos en los rellenos sanitarios pueden ser originados por factores adicionales, tales como: incremento excesivo de la presión intersticial por un drenaje deficiente de lixiviado y biogás, o debilitamiento en la interfase de materiales de baja adherencia (sello basal).

10.2. METODO DE ANALISIS DE ESTABILIDAD.

De acuerdo a lo anteriormente indicado, para el análisis de estabilidad de los taludes del Relleno Sanitario CEMARC se adoptó el modo de falla circular, rotacional, utilizando el software geotécnico de última generación Slide ampliamente aplicado en el ámbito geotécnico internacional y nacional para el análisis de estabilidad de taludes formados por suelos y rocas, y últimamente en el análisis de estabilidad de taludes de rellenos sanitarios domiciliarios.

El análisis de estabilidad realizado consistió en la búsqueda sistemática de las superficies de falla circular que exhiben el menor factor de seguridad para la más crítica combinación de superficies de deslizamiento, parámetros resistentes, coeficiente de aceleración sísmica, geometría del talud y posición del nivel freático. El análisis se realizó con la técnica de equilibrio límite bidimensional (mediante perfiles), y los supuestos adoptados en el análisis son los siguientes.

- El material que conforma el talud es homogéneo, es decir, las propiedades mecánicas no varían con la dirección de la carga aplicada.
- La resistencia al corte del material σ_s , depende de la cohesión c , y del ángulo de fricción ϕ del material, y estos parámetros están relacionados mediante la siguiente expresión (criterio lineal de Mohr – Coulomb): $\sigma_s = c + \sigma_n \tan \phi$
- La superficie de falla en el talud es de tipo circular, y pasa por la base del talud, teniendo un estado aceptable.
- Se considera un talud con nivel freático normal.

Es preciso destacar que la confiabilidad de un análisis de estabilidad está directamente asociada a la confiabilidad de su input, del método de análisis adoptado, la versatilidad de la herramienta de cálculo (software), y la capacidad del especialista para efectuar un adecuado análisis.

10.3. CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD.

Según los perfiles identificados del relleno sanitario y a partir de lo indicado en el decreto 189 artículo 15 *"En todo proyecto de relleno Sanitario los taludes durante la construcción de las celdas sanitarias y las pendientes finales de la masa de basura no deberán ser superiores a 1V:3H. Excepcionalmente el Proyecto podrá considerar la construcción de taludes con inclinación superiores a la señalada, para lo que deberá incluir un estudio debidamente fundamentado que garantice la seguridad del personal que trabaja en la instalación o que tiene acceso a ella, debiendo demostrar al menos que la relación entre los esfuerzos resistentes y los esfuerzos deslizantes es mayor o igual a 1,5 en condición estática y mayor o igual a 1,3 bajo condiciones dinámicas"*

Debido a lo indicado anteriormente y que los taludes del Relleno a diciembre de 2016, presenta un ángulo de talud entre 31° a 39°, mayor a lo indicado en el artículo 15 correspondiente a 18° (1V:3H), en este estudio se adoptó como criterio de aceptabilidad un factor de seguridad estático mínimo de 1.5 (FS estático ≥ 1.5), y uno sísmico mínimo de 1.3 (FS sísmico ≥ 1.3)

10.4. PROCEDIMIENTO DE ANALISIS.

El análisis de estabilidad se realizó en base a 5 perfiles trazados en los taludes del relleno según se indica en el Anexo Gráficos de Resultados, y su procedimiento consistió en la determinación de los factores de seguridad al modelo geotécnico del talud representado en cada perfil para las 2 situaciones consideradas claves en su estabilidad: estático con nivel freático y pseudo-estático con nivel freático, cuyos resultados se presentan en Tabla 5.

Tabla 5: Resumen Factores de Seguridad Relleno

Perfil Analizado	Factor de Seguridad Estático con nivel freático ($A_0=0$)	Factor de Seguridad Pseudo-Estático con nivel freático ($A_0= 0.15$)
Perfil 1	3,2	2,4
Perfil 2	1,8	1,3
Perfil 3	1,8	1,3
Perfil 4	2,0	1,5
Perfil 5	1,6	1,3

De acuerdo a estos resultados se puede inferir que para la geometría, características geotécnicas, y condición sísmica, el Relleno Sanitario CEMARC de Coyhaique presentan una adecuada condición de estabilidad, dado que los factores de seguridad obtenidos exceden los valores adoptados para verificar dicha estabilidad, según lo indicado en el decreto 189 del artículo 15 los factores de seguridad obtenidos son mayores o igual a: 1.5 ($FS_{estático} \geq 1.5$) en el caso estático , y 1.3 ($FS_{sísmico} \geq 1.3$) en el caso sísmico.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Según este análisis, se infiere que para la geometría, condición geotécnica y sísmica de los taludes actuales, estos exhiben una adecuada estabilidad, ya que los factores de seguridad obtenidos exceden los valores adoptados para cuantificar su estabilidad, es decir, se cumple la condición $FS_{\text{estático}} \geq 1.5$ y $FS_{\text{sísmico}} \geq 1.3$, según lo indicado en el decreto 189 artículo 15, los taludes presenta una condición estable.

Perfil Analizado	Factor de Seguridad Estático con nivel freático ($A_0=0$)	Factor de Seguridad Pseudo-Estático con nivel freático ($A_0= 0.15$)
Perfil 1	3,2	2,4
Perfil 2	1,8	1,3
Perfil 3	1,8	1,3
Perfil 4	2,0	1,5
Perfil 5	1,6	1,3

- Inspección visual periódica para detectar el eventual agrietamiento de los taludes perimetrales, que indica una situación de inestabilidad incipiente que se debe evaluar, y si la magnitud del problema lo indica, proceder a un sistemático control instrumental.


Michael Santander T.
Ingeniero Civil
Universidad de Chile

12. REFERENCIAS & BIBLIOGRAFIA.

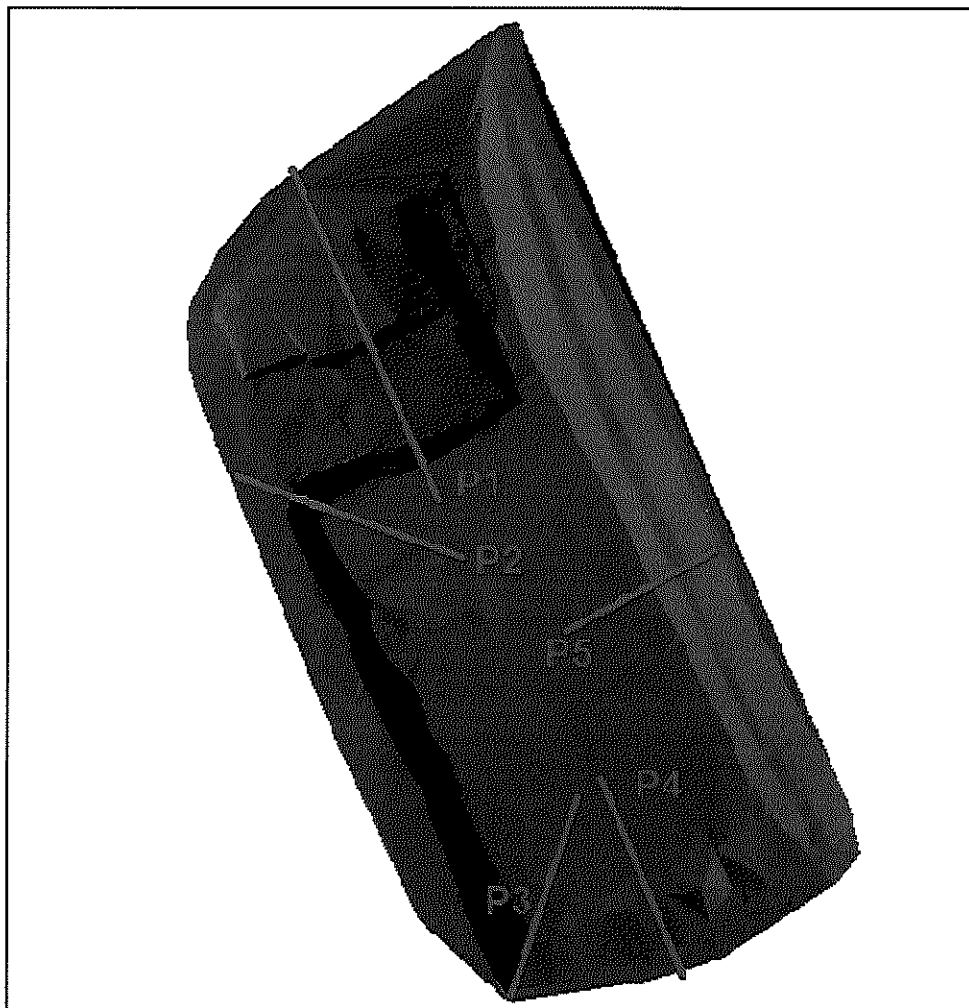
1. Plan de Implementación de Medidas para el Control de la Estabilidad en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados.
KDM S. A., Mayo 2009.
2. Análisis de Estabilidad Fase 2abc6, Relleno Sanitario Loma Los Colorados, Plan de Llenado 2007, KDM S.A., Agosto 2007.
3. Informe Técnico: Definición de Emplazamiento para la Co-Disposición en el Corto Plazo, en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados.
Grupo de Geotecnia, PUCV, Agosto del 2005.
4. Solid Waste Disposal Facility Criteria – Technical Manual.
U. S. Environmental Protection Agency (EPA), Revised April 1998.
5. Design and Operational Issues Related to the Co-Disposal of Sludges and Biosolids in Class I Landfill – Phase II.
Debra R. Reinhart, Report N° 0332002-05, August 2008, U. of Florida.
6. Design and Operational Issues Related to the Co-Disposal of Sludges and Biosolids in Class I Landfill – Phase III.
Debra R. Reinhart, Report N° 0432023, March 2007, U. of Florida.
7. Design and Operational Issues Related to the Co-Disposal of Sludges and Biosolids in Class I Landfill.
Debra R. Reinhart, Report N° 0132010-03, July 2003, U. of Florida.
8. Diseño Sísmico de Edificios – Earthquake Resistant Design of Building.
Norma Chilena Oficial, NCh 433–Of. 96 Modificada 2009, INN, Chile, 2009.
9. Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales.
Norma Chilena Oficial, NCh 2569–Of. 2003, INN Chile, 2003.
10. Regionalización Sísmica de Chile, Tesis de Magister en Ciencias.
Depto. de Geofísica, Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Barrientos, S. & Kausel, E., Universidad de Chile, 1980.

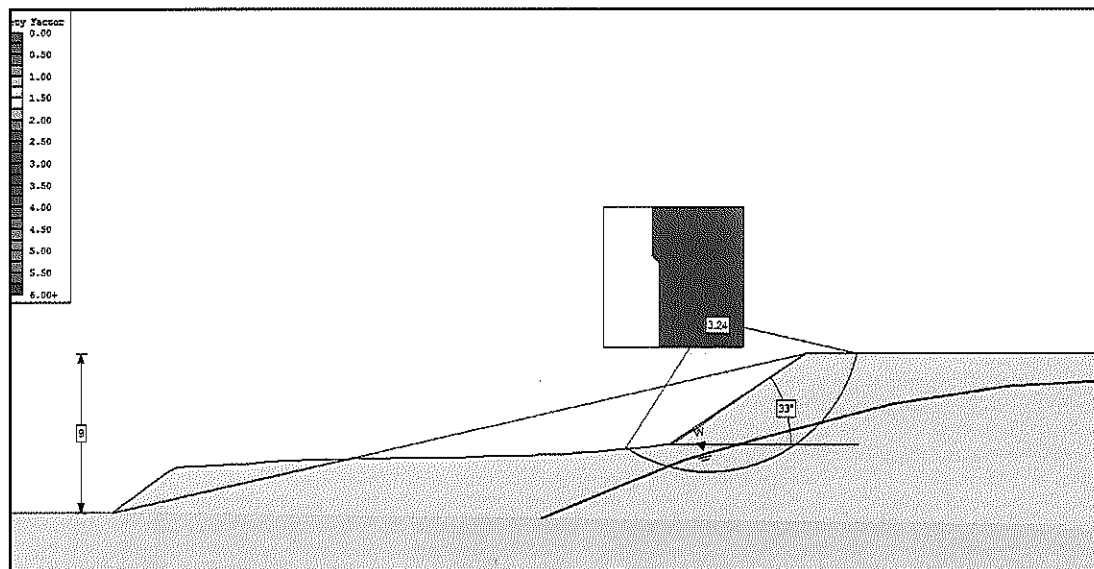
11. Slope Analysis, Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 22.
Chowdhury, R. N, Elsevier Scientific Publishing Co, 1978.
12. Waste Embankments: Pit Slope Manual, Chapter 9.
Canada Centre for Mineral & Energy Technology, CANMET, 1977.
13. Slide 5.0: 2-D Limit Equilibrium Slope Analysis for Soil and Rock Slopes.
User's Guide, Rocscience Inc., 1989–2003.
14. Estudio de Impacto Ambiental EIA_6223_Descripcion del Proyecto, Ingeniería Alemana, 2003.
15. Estudio de Impacto Ambiental EIA_6223_Resumen Ejecutivo, Ingeniería Alemana, 2003.
16. Estudio de Impacto Ambiental EIA_6223_Anexos, Ingeniería Alemana, 2003.
17. -Plano Control Relleno_2016-09-30_rev00Lamina 1 de 4, Septiembre de 2016, RESCO
18. -Plano Control Relleno_2016-09-30_rev00Lamina 2 de 4, Septiembre de 2016, RESCO.
19. -Plano Control Relleno_2016-09-30_rev00Lamina 3 de 4, Septiembre de 2016, RESCO.
20. -Plano Control Relleno_2016-09-30_rev00Lamina 4 de 4, Septiembre de 2016, RESCO.

13. ANEXO GRAFICOS DE RESULTADOS.

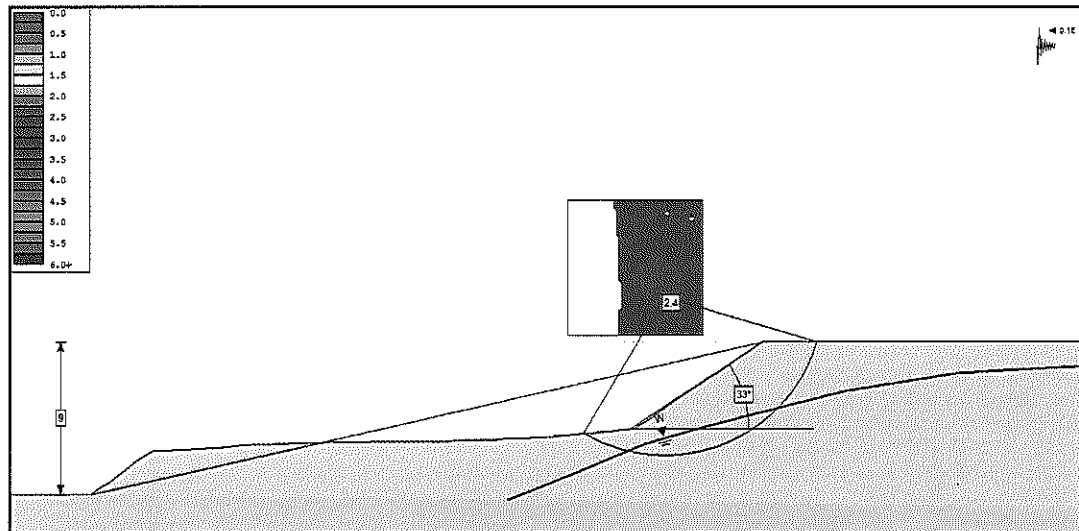
Ubicación de Perfiles para el Análisis de Estabilidad del Relleno Sanitario.



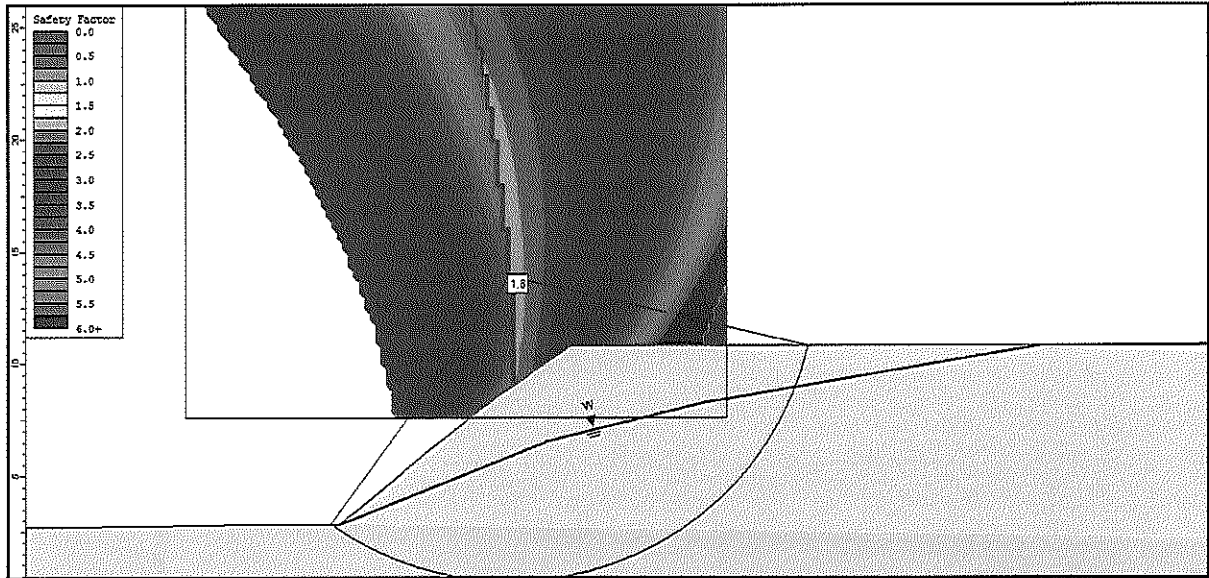
Perfil 1 Análisis Estático con Nivel Freático FS= 3.2



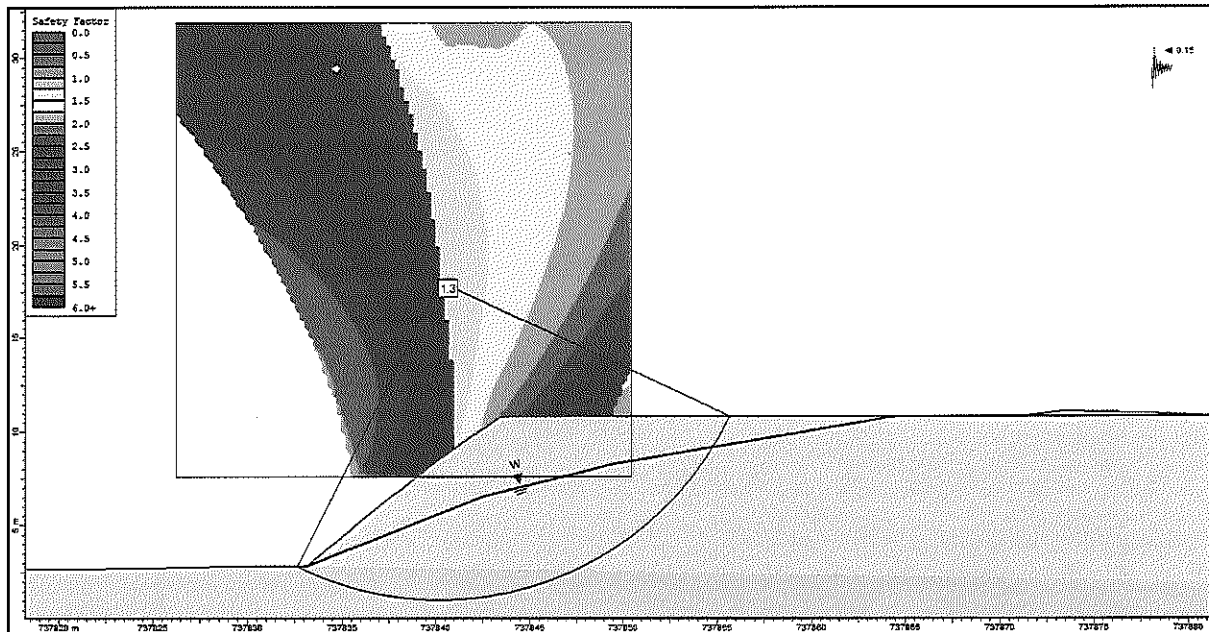
Perfil 1 Análisis Pseudo-Estatico $A_0: 0,15$ con Nivel Freático con FS= 2.4



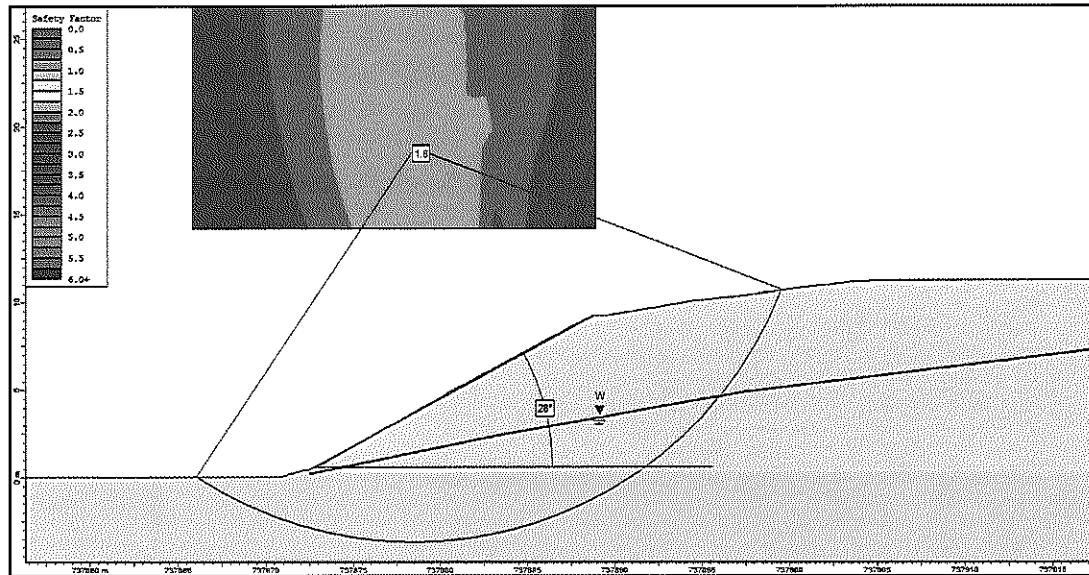
Perfil 2 Análisis Estático con Nivel Freático FS= 1.8



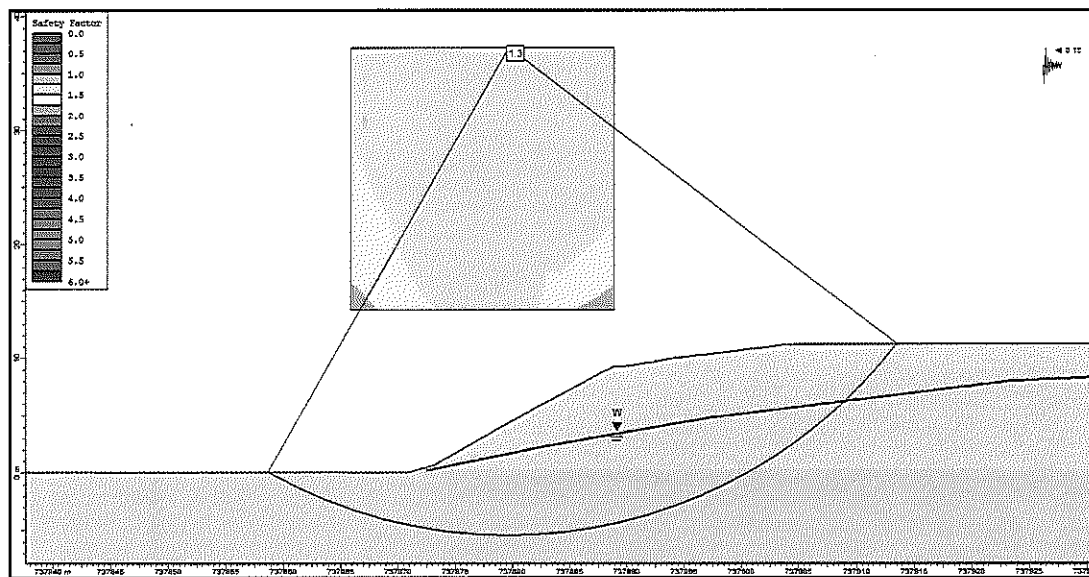
Perfil 2 Análisis Pseudo-Estatico $A_0: 0,15$ con Nivel Freático con FS= 1.3



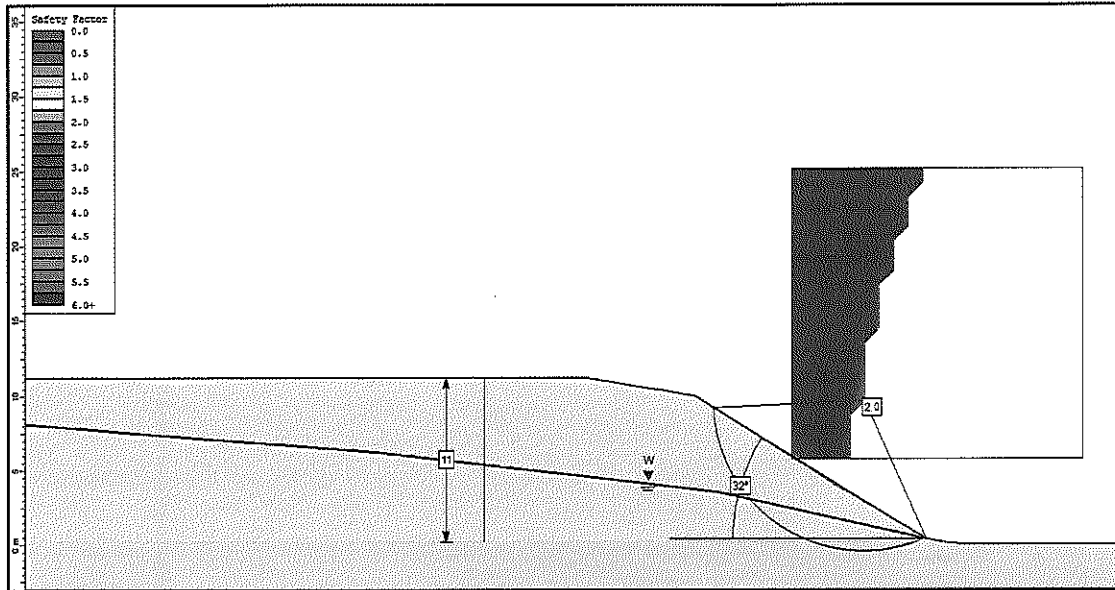
Perfil 3 Análisis Estático con Nivel Freático FS= 1.8



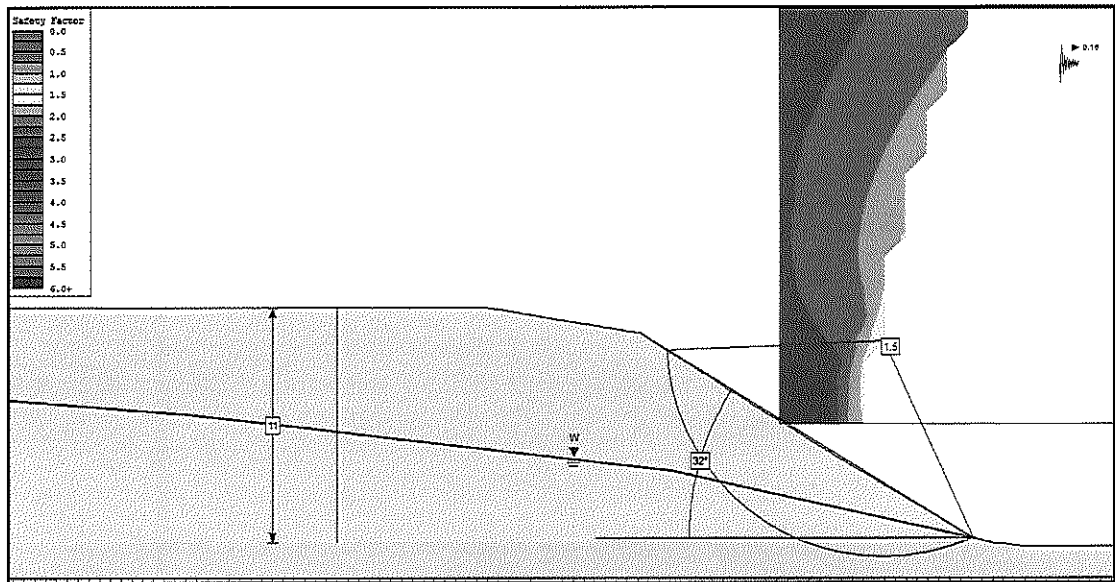
Perfil 3 Análisis Pseudo-Estatico $A_0: 0,15$ con Nivel Freático con FS= 1.3



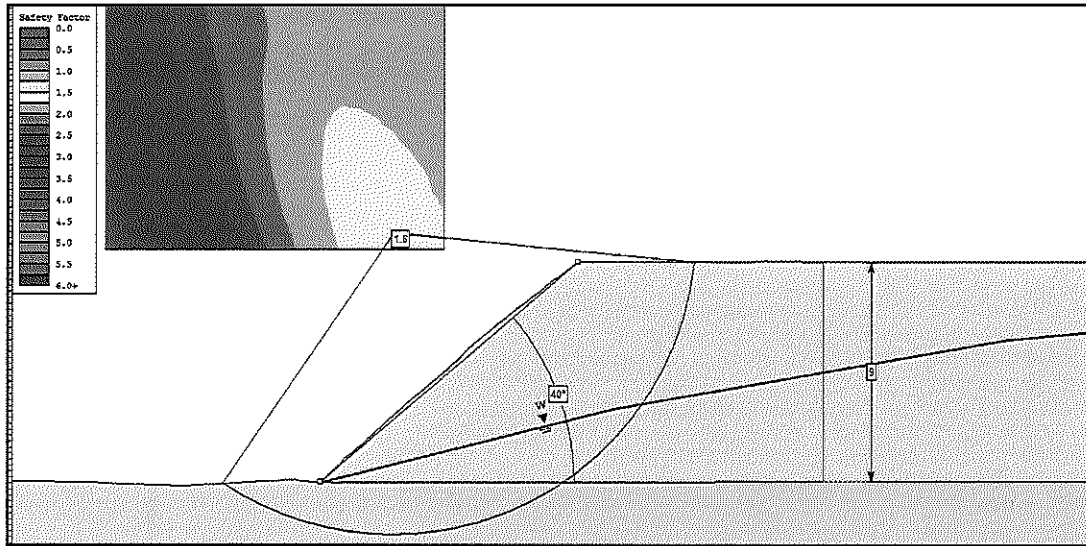
Perfil 4 Análisis Estático con Nivel Freático FS= 2.0



Perfil 4 Análisis Pseudo-Estatico $A_0: 0,15$ con Nivel Freático con FS= 1.5



Perfil 5 Análisis Estático con Nivel Freático FS= 1.6



Perfil 5 Análisis Pseudo-Estatico $A_0: 0,15$ con Nivel Freático con FS= 1.3

