



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA UNIDAD ZACATENCO**

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA LA AMPLIACIÓN  
DE UNA PRESA DE JALES**

**INFORME DE PRÁCTICAS PROFESIONALES**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL**

PRESENTA

**ABIGAIL RICO HERNÁNDEZ**

ASESORES:

**ING. MANUEL SÁNCHEZ HERRERA**

**M. EN I. DAVID SOLÍS VILLALOBOS**

**ABRIL, 2016.**



México, D.F. a 17 de julio de 2015  
No. SA.1602.VII.2015

ASUNTO: SE DESIGNA ASESOR  
DE PRÁCTICA PROFESIONAL

**ING. MANUEL SÁNCHEZ HERRERA**  
**PROFESOR DE LA ACADEMIA DE GEOTECNIA**  
**TURNO VESPERTINO**  
**PRESENTE.**

Con base en su experiencia profesional, y actuación docente en la Academia de Geotecnia y de acuerdo al Colegio de Profesores, ha sido designado asesor de la **C. Abigail Rico Hernández**, pasante de la carrera de Ingeniería Civil, en la elaboración del informe de su Práctica Profesional, el cual debe apegarse al programa y calendarización anexa.

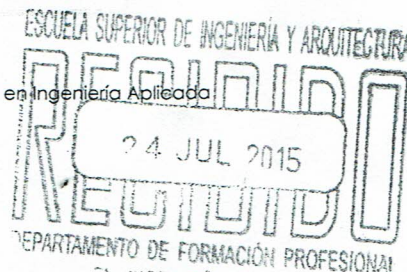
Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

**ING. RAFAEL LÓPEZ RAMOS**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO INTERINO



Ccp. ~~Ing. Judith Hernández Genis~~ - Jefa del Departamento de Formación Profesional en Ingeniería Aplicada  
Expediente.



RLR/JHG/lob\*

Av. Juan de Dios Bátiz S/N Edificio 10, 11, 12, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos" Zacatenco, México, D.F. 07738  
Tel. 57296000 Ext. 53078

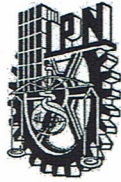


SEP

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
UNIDAD ZACATENCO  
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA



ACTA DE REVISIÓN DE TRABAJO TERMINAL

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 18:00 horas del día 13 del mes de Mayo del año 2016, se reunieron los miembros de la Comisión Revisora designada por la Subdirección Académica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, para revisar el trabajo terminal "Análisis de Estabilidad para la ampliación de una presa de jales" que presenta el c. Abigail Rico Hernández, con número de boleta 201031129, pasante de la carrera de Ingeniería Civil, plan 2004, para obtener el título de Ingeniero Civil.

Ya revisada y después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión acordaron **APROBAR EL TRABAJO TERMINAL.**

COMISIÓN REVISORA

Asesor de trabajo terminal

<u>Manuel Sánchez Herrera</u> (nombre y firma)	<u>Magdaleno Martínez Gótz</u> (nombre y firma)
<u>Rosa María Milán Valdés</u> (nombre y firma)	<u>José Flores</u> (nombre y firma)
<u>Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda</u> (nombre y firma)	<u>Bernardo N. Ferrasco Mayo</u> (nombre y firma)

Se anexa a la presente un ejemplar del trabajo terminal.

ATENTAMENTE  
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA U. ZAC  
DECIDIDO

17 MAY 2016

14:27 Pm

<u>[Signature]</u> (NOMBRE Y FIRMA) Presidente de la Academia de	Vº/Bº. <u>[Signature]</u> Subdirección Académica
--	--





FORMATO F3

Asunto: Solicitud de titulación  
Para la Opción de Prácticas Profesionales

México D.F., a 13 de Mayo de 2016.

ING. RAFAEL LÓPEZ RAMOS  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO INTERINO  
DE LA ESIA U. ZACATENCO  
P r e s e n t e

Una vez concluido el proceso de revisión y aprobación del trabajo terminal de titulación del pasante C.  
Aligail Rico Hernández  
con número de boleta 2010311129  
se solicita la fecha del acto de titulación correspondiente, por lo que se anexa el Acta de la Comisión Revisora del trabajo terminal y se propone el siguiente jurado, conforme al capítulo VI del Reglamento de Titulación Profesional del IPN.

Presidente

Marvel Sánchez Herrera  
(Nombre y firma)

Secretario

Hugo Flores Blanco  
(Nombre y firma)

Primer Vocal

Rosa María Wilán Valdés  
(Nombre y firma)

Segundo Vocal

MAGDALENO MARTINEZ GOVEA  
(Nombre y firma)

Tercer Vocal

Miguel Ángel Nivalcabe Sepúlveda  
(Nombre y firma)

Suplente

Bernardo R. Contreras Maya  
(Nombre y firma)

ATENTAMENTE

[Firma]  
(Nombre y firma)

Ing. Bernardo R. Contreras Maya  
Presidente de la Academia de GEOTECNIA

UNIDAD ZACATENCO  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA U. ZAC.

17 MAY 2016

14:27 PM  
SUBDIRECCIÓN  
ACADÉMICA



CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D. F., el día 23 del mes de Mayo del año 2016,  
el (los) que suscribe (n)

C. Abigail Rico Hernández

alumno (s) de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, con número (s) de  
boleta 2010311129, manifiesta (n) ser el autor (es) intelectual (es) del presente Trabajo  
Terminal y haber sido asesorado (s) por el (los) C. (CC.):

Ing. Manuel Sánchez Herrera

M. en I. David Solís Villalobos

y cede (n) los derechos del trabajo titulado:

"Análisis de estabilidad para la ampliación  
de una presa de dales"

A los usuarios de la información aquí contenida, no se les autoriza a reproducirla por ningún medio, sin  
la autorización expresa de su autor, la cual se puede obtener solicitándola al correo electrónico del  
pasante: abyrico.geo@gmail.com, si el permiso se otorga, el usuario  
deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
Abigail Rico Hernández  
Nombre y firma

## AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
PRESENTE.


Bajo protesta de decir la verdad el que suscribe C. Abigail Rico Hernández (se anexa copia simple de la identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "Análisis de estabilidad para la ampliación de una presa de Jales", en adelante "El informe de prácticas profesionales" y del cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la ley federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante el IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales para consulta a la comunidad politécnica "El informe de prácticas profesionales" por un periodo de 6 meses contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovara automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "La Tesis".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "El informe de prácticas profesionales", manifiesto que el mismo es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "El informe de prácticas profesionales" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad, o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

México, D.F., a 23 de Mayo de 20 16..

ATENTAMENTE

  
Abigail Rico Hernández



MÉXICO INSTITUTO NACIONAL ELECTORAL  
 CREDENCIAL PARA VOTAR

NOMBRE  
 RICO  
 HERNANDEZ  
 ABIGAIL  
 DOMICILIO  
 COL GUERRERO 06300  
 CUAUHEMOC, D.F.

FECHA DE NACIMIENTO  
 02/10/1991  
 SEXO M

CLAVE DE ELECTOR RCHRAB91100221M400

CURP RIHA911002MPLCRB00 AÑO DE REGISTRO 2009 02

ESTADO 09 MUNICIPIO 015 SECCIÓN 4700

LOCALIDAD 0001 EMISIÓN 2014 VIGENCIA 2024





INE

EDMUNDO JACOBO MOLINA  
 SECRETARIO EJECUTIVO DEL  
 INSTITUTO NACIONAL ELECTORAL

IDMEX1224252237<<4700084544739  
 9110029M2412311MEX<02<<44783<5  
 RICO<HERNANDEZ<<ABIGAIL<<<<<<<

## ÍNDICE

1.	Introducción .....	10
1.1	Antecedentes históricos.....	11
1.2	Definición de jal .....	12
1.3	Elementos de las presas de jales.....	12
1.4	Marco Legal y Normativo .....	13
1.5	Tipos de métodos constructivos en presas de jales .....	13
2.	Objetivos .....	14
2.1	Objetivos generales .....	14
2.2	Objetivos particulares.....	14
3.	Justificación.....	14
4.	Descripción del proyecto .....	15
5.	Trabajos en campo .....	19
5.1	Campaña de exploración de mecánica de suelos.....	19
5.2	Campaña de exploración geofísica.....	23
5.2.1	<b>Vibración Ambiental (VA1 – VA2).</b> ....	24
5.2.2	<b>Sondeo Eléctrico Vertical (SEV 1)</b> .....	25
5.2.3	<b>Tendido de Refracción Sísmica (TRS)</b> .....	26
5.2.3.1	TRS 1 .....	26
5.2.3.2	TRS 2 .....	27
5.2.3.3	TRS 3 .....	28
5.2.3.4	TRS 4 .....	29
5.2.4	<b>Espectro de diseño</b> .....	32
6.	Trabajos en laboratorio .....	34
6.1	Resultados de las propiedades índices y pruebas mecánicas del jal que se colocará en la ampliación .....	34



6.2	Resultados de las pruebas de laboratorio efectuadas en los sondeos llevados a cabo sobre el depósito actual.....	36
7.	Determinación del perfil estratigráfico y parámetros de resistencia del corte a analizar. 58	
7.1	Parámetros del depósito actual.....	59
7.2	Parámetros de la ampliación .....	61
8.	Análisis de estabilidad .....	63
8.1	Métodos de análisis de estabilidad de equilibrio límite.....	63
8.2	Método Ordinario de Fellenius .....	67
8.3	Método de Bishop .....	68
8.4	Método de Janbu .....	69
8.5	Método de Spencer .....	69
8.6	Método de Morgenstern-Price .....	70
9.	Acción sísmica .....	71
10.	Análisis de estabilidad de la zona en estudio .....	71
11.	Conclusiones .....	78
12.	Bibliografía .....	79

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1.	Localización en planta de la presa de jales actual. Flopac, 2015a.....	15
Figura 4.2	Vista de la cara “aguas abajo” de la cortina del depósito de jales actual. Flopac, 2015a.....	15
Figura 4.3	Vista de la corona y la zona de playa del depósito actual. Flopac, 2015a.....	16
Figura 4.4	Vista de “aguas arriba” de la cortina del depósito actual. Flopac, 2015a.....	16
Figura 4.5	Localización en planta de la geoemtría de la ampliación. Flopac, 2015a.....	17
Figura 4.6	Vista “aguas debajo” de la zona en donde se pretende colocar el bordo iniciador. Flopac, 2015.....	18

Figura 5.1.1 Localización de los sondeos mixtos. Flopac, 2015b.....	20
Figura 5.2.1 Localización general de los sondeos geofísicos. Flopac, 2015c.....	23
Figura 5.2.1.1 Cocientes espectrales H/V obtenidos a partir de la VA 1. $F_s=2.53$ Hz y $T_s=0.40$ s. Flopac, 2015c.....	24
Figura 5.2.1.2 Cocientes espectrales H/V obtenidos a partir de la VA 2. $F_s=46.13$ Hz y $T_s=0.02$ s. Flopac, 2015c.....	25
Figura 5.2.2.1 Perfil del sondeo eléctrico vertical No.1. Flopac, 2015c.....	26
Figura 5.2.3.1.1 Sección sismoestratigráfica del tendido de refracción sísmica No.1. Flopac, 2015c.....	27
Figura 5.2.3.2.1 Sección sismoestratigráfica del tendido de refracción sísmica No.2. Flopac, 2015c.....	28
Figura 5.2.3.3.1 Sección sismoestratigráfica del tendido de refracción sísmica No.3. Flopac, 2015c.....	29
Figura 5.2.3.4.1 Sección sismoestratigráfica del tendido de refracción sísmica No.4. Flopac, 2015c.....	30
Figura 5.2.4. Espectro de Diseño Sísmico transparente. Manual de Diseño por Sismo de CFE, 2008. Flopac, 2015c.....	32
Figura 5.2.4.2 Espectros de Diseño Sísmico recomendados. Manual de diseño por sismo de CFE, 2008. Flopac, 2015c.....	33
Figura 6.1.1 Representación gráfica de los resultados de las pruebas triaxiales. Flopac, 2015d.....	35
Figura 6.2.1 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 01. Flopac, 2015e.....	42
Figura 6.2.2 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 01. Flopac, 2015e.....	43
Figura 6.2.3 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 02. Flopac, 2015e.....	45
Figura 6.2.4 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 02. Flopac, 2015e.....	46
Figura 6.2.5 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 03. Flopac, 2015e.....	48
Figura 6.2.6 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 03. Flopac, 2015e.....	49
Figura 6.2.7 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 04. Flopac, 2015e.....	51
Figura 6.2.8 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 04. Flopac, 2015e.....	52
Figura 6.2.9 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 05. Flopac, 2015e.....	54
Figura 6.2.10 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 05, profundidad 60.20 m. Flopac, 2015e.....	55



Figura 6.2.11 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 06. Flopac, 2015e.....	57
Figura 7.1 Corte 01, condiciones actuales. Flopac, 2015f.....	58
Figura 7.2 Corte 01, condiciones con sobre-elevación. Flopac, 2015f.....	58
Figura 7.1.1 Estratigrafía del depósito actual y parámetros asignados. Flopac, 2015f.....	59
Figura 8.1.1 Fuerzas involucradas en el análisis de estabilidad por el método GLE.....	63
Figura 8.3.1 Fuerzas actuantes en una dovela.....	68
Figura 8.5.1 Fuerzas actuantes en una dovela por el método de Spencer.....	70
Figura 10.1 Corte 01, condiciones actuales. Flopac, 2015f.....	72
Figura 10.2 Corte 01, condiciones con sobre-elevación. Flopac, 2015f.....	73
Figura 10.3 Modelo Geotécnico de la ampliación del depósito de jales. Flopac, 2015f.....	74
Figura 10.4 Círculo de falla para el modelo de la ampliación, FS=1.899 condición estática. Flopac, 2015f.....	74
Figura 10.5 a) factores de seguridad de la etapa actual y b) factores de seguridad correspondientes a la ampliación del depósito de jales en estudio. Flopac, 2015f.....	77
Figura AI.1 Método “aguas arriba” con espigas, NOM-141-SEMARNAT 2003.....	82
Figura AII.1.1 Localización en planta de la ampliación de la presa actual.....	85
Figura AII.1.1.1 Bordo iniciador en su etapa final.....	86
Figura AII.1.1.2 Granulometría recomendada para terraplenes (CFE, 1980 y González de Vallejo, 2002).....	88
Figura AII.1.2.1 Conformación de capas compactadas.....	89
Figura AII.1.3.1 Revestimiento del talud.....	89
Figura AII.1.4.1 Carta hidrológica de la República (SEMARNAT, 2003).....	90
Figura AII.1.4.2 Conformación de bermas y capas compactadas.....	91
Figura AIII.1. Correlación de Scmertmann (1985) entre NF y $\sigma'0$ (Das, B., 2001).....	94
Figura AIII.2. Correlación de Peck, Hanson y Thornburn para obtener el $\phi$ (Lambe, T., y Withman, R., 2002).....	94
Figura AIII.3 Correlación entre Ncorr y $\phi$ (tomado de Rico, A., Del Castillo, H., 2003).....	95
Figura AIII.4 Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-01. Flopac, 2015f.....	97
Figura AIII.5 Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-02. Flopac, 2015f.....	98

Figura AIII.6	Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-03. Flopac, 2015f.....	99
Figura AIII.7	Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-04. Flopac, 2015f.....	100
Figura AIII.8	Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-05. Flopac, 2015f.....	101
Figura AIII.9	Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-06. Flopac, 2015f.....	102
Figura AIV-1	Análisis estático, corte 01 etapa actual (E-01). Flopac, 2015f.....	104
Figura AIV-2	Análisis accidental por sismo, corte 01 etapa actual (E-01). Flopac, 2015f.....	104
Figura AV-1	Análisis estático, corte 01-berma 1, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	106
Figura AV-2	Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 1, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	106
Figura AV-3	Análisis estático, corte 01-berma 2, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	107
Figura AV-4	Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 2, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	107
Figura AV-5	Análisis estático, corte 01-berma 3, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	108
Figura AV-6	Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 3, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	108
Figura AV-7	Análisis estático, corte 01-berma 4, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	109
Figura AV-8	Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 4, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	109
Figura AV-9	Análisis estático, corte 01-berma 5, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	110
Figura AV-10	Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 5, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	110
Figura AV-11	Análisis estático, corte 01-berma 6, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	111
Figura AV-12	Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 6, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	111
Figura AV-13	Análisis estático, corte 01-berma 7, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	112

Figura AV-14 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 7, lado norponiente, etapa 2 (E- 02). Flopac, 2015f.....	112
Figura AV-15 Análisis estático, corte 01-berma 8, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	113
Figura AV-16 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 8, lado norponiente, etapa 2 (E- 02). Flopac, 2015f.....	113
Figura AV-17 Análisis estático, corte 01-berma 7, lado noreste, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	114
Figura AIV-18 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 7, lado noreste, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	114
Figura AV-19 Análisis estático, corte 01-berma 8, lado noreste, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	115
Figura AV-20 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 8, lado noreste, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.....	115

## LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1.1 Sondeos, pruebas y trabajos realizados en la campaña de exploración de mecánica de suelos. Flopac, 2015b.....	20
Tabla 5.1.2 Resultados de las pruebas de permeabilidad tipo Lefranc. Flopac, 2015b.....	21
Tabla 5.1.3 Resultados de las pruebas de permeabilidad tipo Lugeon. Flopac, 2015b.....	21
Tabla 5.1.4 Resultados de las pruebas de ficómetro. Flopac, 2015b.....	21
Tabla 5.1.5 Resultados de las pruebas de comprensión simple efectuadas en las muestras recuperadas de los sondeos de roca. Flopac, 2015b.....	22
Tabla 5.1.6 Resultados de la prueba de RQD efectuadas a las muestras de roca recuperadas de los sondeos de roca. Flopac, 2015b.....	22
Tabla 5.2.1.1 Periodos dominantes del sitio. Flopac, 2015c.....	24
Tabla 5.2.3.1 Propiedades dinámicas del TRS 1. Flopac, 2015c.....	30
Tabla 5.2.3.2 Propiedades dinámicas del TRS 2. Flopac, 2015c.....	31
Tabla 5.2.3.3 Propiedades dinámicas del TRS 3. Flopac, 2015c.....	31
Tabla 5.2.3.4 Propiedades dinámicas del TRS 4. Flopac, 2015c.....	31
Tabla 5.2.4.1 Parámetros que definen la forma del espectro de diseño para Q=1. Flopac, 2015c.....	32



Tabla 5.2.4.2 Parámetros para la construcción del espectro de diseño sísmico sugerido. Flopac, 2015c.....	33
Tabla 6.1.1 Resultados de las propiedades índices del jal para la ampliación. Flopac, 2015d.....	34
Tabla 6.1.2 Resultado de pruebas triaxiales. Flopac, 2015d.....	35
Tabla 6.2.1 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mixto 01. Flopac, 2015e.....	36
Tabla 6.2.2 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mixto 02. Flopac, 2015e.....	37
Tabla 6.2.3 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mixto 03. Flopac, 2015e.....	38
Tabla 6.2.4 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mixto 04. Flopac, 2015e.....	38
Tabla 6.2.5 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mixto 05. Flopac, 2015e.....	38
Tabla 6.2.6 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mixto 06. Flopac, 2015e.....	39
Tabla 6.2.7 Resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras recuperadas de los tubos Shelby. Flopac, 2015e.....	39
Tabla 6.2.8 Resultados de las pruebas triaxiales tipo UU realizadas a las muestras recuperadas de los tubos Shelby. Flopac, 2015e.....	40
Tabla 6.2.9 Resultados de las pruebas triaxiales tipo UU realizadas a las muestras recuperadas de los tubos Shelby. Flopac, 2015e.....	40
Tabla 7.1.1 Parámetros asignados a la estratigrafía del depósito actual. Flopac, 2015f.....	60
Tabla 7.2.1 Parámetros asignados a la estratigrafía de la ampliación. Flopac, 2015f.....	62
Tabla 10.1 Parámetros considerados para el análisis de estabilidad del depósito actual. Flopac, 2015f.....	75
Tabla 10.2 Parámetros considerados para el análisis de estabilidad de la ampliación. Flopac, 2015f.....	76
Tabla 10.3. Factores de seguridad para las diferentes condiciones del depósito. Flopac, 2015f.....	77
Tabla All.1 Correcciones de N para obtener el ángulo de fricción ( $\phi$ ), método de Hatanaka 1996 (modificado de Das, B., 2001).....	86
Tabla All.2. Correlaciones entre N y la cohesión del material (Das, B., 2001).....	88

## ANEXOS

AI. Método constructivo “aguas arriba” con espigas del depósito actual.....	81
AI. Método constructivo “aguas arriba” con jal prensado y compactado.....	83
AII. Correlaciones para obtener parámetros mecánicos a partir del número de golpes de las pruebas SPT y asignación de parámetros volumétricos y mecánicos para el análisis de estabilidad.....	91
AIII. Análisis de estabilidad del depósito actual, E-01.....	102
AIV. Análisis de estabilidad de la ampliación, E-02.....	104

## 1. Introducción

Con base en la necesidad de continuar con la disposición de jales provenientes de una planta de beneficio ubicada al norte de México, se desarrolló el proyecto denominado "Análisis de estabilidad para la ampliación de una presa de jales".

Debido a que con anterioridad ya se encontraba una presa de jales en el área de estudio fue más fácil cumplir con los lineamientos que establecen la SEMARNAT Y la LGEEPA ya que se hizo uso de los estudios de impacto ambiental que se llevaron a cabo anteriormente.

El proyecto consiste en la sobre-elevación de una presa de jales en un área donde actualmente se encuentra una presa de jales que está fuera de operación, por lo que, se propuso una geometría a la cual se le efectuó un análisis de estabilidad en condiciones actuales y en condiciones con sobre-elevación. El análisis se efectuó con el Software Slide 5.0, se analizó con el método general de equilibrio límite.

Para poder definir los parámetros que se emplearon en el análisis de estabilidad, se llevó a cabo una exploración de mecánica de suelos en la que se realizaron 6 sondeos mixtos (ensayos de penetración estándar (SPT, extracción de muestras inalteradas, ensayos de ficómetro y permeabilidad) a diferentes profundidades en el depósito actual, así como sondeos en roca en el sitio donde se pretende colocar el bordo iniciador de la ampliación.

De las muestras alteradas e inalteradas se determinaron propiedades índice de los materiales (contenido de agua, densidad de sólidos, porcentajes de finos y arenas, y pesos específicos, entre otros) y se clasificó según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). De las muestras inalteradas en las que fue posible labrar probetas se determinaron sus parámetros mecánicos con ensayos triaxiales tipo no consolidado no drenado para obtener las curvas esfuerzo vs deformación axial y a partir de éstas el ángulo de fricción y cohesión aparentes del suelo.

A partir de los resultados de SPT obtenidos durante la exploración se estimaron el ángulo de fricción y la cohesión, haciendo uso de algunas correlaciones propuestas en la literatura técnica.

Con los resultados de los ensayos de laboratorio, las correlaciones y los resultados de los ensayos de ficómetro, se construyeron perfiles con los números de golpes (del ensayo SPT), contenido de agua y con la variación del ángulo de fricción y la cohesión. A partir de estos perfiles se definió una estratigrafía del depósito actual en la que a cada estrato se le asignaron los parámetros mecánicos requeridos para el análisis de estabilidad (ángulo de fricción, cohesión y peso específico del material).

Respecto a los trabajos de exploración geofísica, se realizaron ensayos de refracción sísmica para determinar los perfiles de velocidad de los materiales que conforman los depósitos y el terreno natural, ensayos de vibración ambiental para obtener el periodo fundamental del suelo y sondeos eléctricos verticales para definir los espesores de los diferentes materiales que conforman el depósito y el subsuelo. Con base en estos resultados se realizó un análisis de riesgo



sísmico, a partir del cual se obtuvo un espectro de diseño del sitio y la aceleración en superficie ( $a_0$ ), parámetro que se requiere para el análisis de estabilidad bajo condiciones accidentales por sismo.

Para la ampliación se propuso una geometría con pendientes 2:1 (horizontal: vertical), con bermas de anchos variables y de alturas de 15 m, excepto la última berma con 10 m, el depósito se cubrirá con material de préstamo compactado (tepetate de mina) para evitar la erosión eólica y pluvial.

Finalmente se asignaron parámetros al jal depositado y al jal que se colocará en la ampliación y se realizó el análisis de estabilidad en condiciones estáticas y accidentales por sismo para el depósito actual y la ampliación.

Debido a las políticas de privacidad de Flopac Ingeniería S.A. de C.V. quien proporcionó la información del proyecto de este informe, no se mencionan datos como nombre de la presa, localización, etc.

## **1.1 Antecedentes históricos**

La actividad minera en México se remota al menos al siglo XVI, ya que la minería fue la base del desarrollo económico y de las comunicaciones de la Nueva España y del México Independiente durante cuatro siglos. Todavía en la actualidad podemos observar residuos mineros (jales) en lugares tan dispersos como Pachuca, Hgo., Zacatecas, Zac., Guanajuato, Gto., Taxco, Gro., Angangeo, Mich., El Oro, Mex., y muchos lugares más. Gran parte de las minas que dieron origen a esos depósitos siguen en operación. Sin embargo, existen muchos otros depósitos de jales abandonados por toda la geografía del país.

La ingeniería mexicana se desarrolló a partir de la creación del Real Seminario de Minas, hace más de 200 años, pero las tecnologías relacionadas con la minería y con la separación de los metales datan de mucho tiempo atrás.

Más recientemente, la Comisión Nacional del Agua, por las atribuciones que la Ley de aguas Nacionales le asigna realiza inspecciones de seguridad de almacenamientos de residuos mineros y recomienda acciones preventivas y correctivas para mejorar la seguridad o restaurar aquellos que han sufrido algún incidente.

Los incidentes conocidos de los años recientes con relación a los almacenamientos de residuos mineros son:

1987: Estado de Querétaro. Desgajamiento de la cortina de la presa No. 3 por lluvias torrenciales, el impacto del derrame llegó hasta el río Moctezuma a 10 km de distancia. El jal derramado fue aproximadamente de 1,500 toneladas.

1995: Estado de Colima. Deslizamiento de jales por la acción de sismo de 7.5 grados Richter con epicentro en la costa del Pacífico.

1996: Estado de Durango y Guanajuato: Rotura de talud y desbordamiento con derrames de residuos a cauces federales y la pérdida de una vida humana en el segundo caso.

1997: Estado de San Luis Potosí. Derrame accidental de residuos mineros con cauce federal por rotura de alcantarilla bajo el almacenamiento.

1998: Estado de Colima: Derrame accidental de residuos mineros a un cauce federal por rotura de alcantarilla bajo el almacenamiento.

1999: Estado de Durango: Derrame de residuos a un cauce federal por la rotura del "jaloducto" que conducía los residuos de almacenamiento.

## **1.2 Definición de jal**

Los jales también conocidos como "colas", son el residuo del proceso de molienda utilizado en la explotación minera. En este proceso, primero, el material extraído es triturado, pulverizado y finalmente, tratado en una planta hidrometalúrgica. En la planta se realiza la separación del mineral, ya sea por los métodos de flotación o cianuración, el metal aprovechado es sólo un pequeño porcentaje de todo el volumen extraído, el material restante termina como un lodo fino y es enviado a un depósito.

Estructuralmente, la estabilidad mecánica de la masa de jales es muy baja, por el tamaño pequeño del grano y sobre todo, el gran contenido de agua.

La mayoría de los volúmenes de jales generados a nivel mundial son descargados en grandes superficies confinadas, denominadas "presas de jales". Los diques o terraplenes que forman estos confinamientos son presas para almacenamiento de desechos.

## **1.3 Elementos de las presas de jales**

Las presas de jales retienen los lodos de jal (sólidos y agua), lo que permite una sedimentación gradual en el fondo del vaso de almacenamiento. Para remover el agua, se utilizan mecanismos de decantación y drenaje, a base de alcantarillas; o se extrae directamente, mediante sifones o bombas montadas en balsas.

Si bien, las presas de jales presentan muchas características similares a las de almacenamiento o derivación, sus necesidades de operación, técnicas de construcción y programas de trabajo, son diferentes, ya que este tipo de obras se construyen y operan de manera simultánea. Por otra parte, presentan además otras funciones, como la clarificación de agua y en algunas ocasiones, se utilizan como depósito para satisfacer las necesidades del recurso en la planta concentradora.

En general, las presas de jales tienen cuatro elementos básicos: la cortina contenedora, vaso de almacenamiento, sistema de decantación y alcantarillas y vertedor de excedencias. Estas obras

se proyectan para abandonarse al término de su vida útil, pero en circunstancias los jales pueden aprovecharse, ya sea para extraer a futuro el material que aún contienen.

#### **1.4 Marco Legal y Normativo**

El marco legal y normativo está constituido por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, las Leyes Federales y sus respectivos reglamentos y las Normas Oficiales Mexicanas, así como por las regulaciones estatales y municipales en la materia.

A continuación se mencionan los lineamientos más importantes para el desarrollo de un proyecto de esta índole.

1. Ley Minera:  
Artículo 39.
2. Ley General de Equilibrio Ecológico (LGEEPA):  
Título Primero, Capítulo I, Artículo 3° fracción XXXII  
Título Cuarto, Capítulo VI, Artículo 150.
3. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (CNA):  
Título Cuarto, Capítulo II, Artículo 30,  
Título Séptimo, Capítulo único, Artículos 88 y 89.  
Reglamento: Artículo 124, último párrafo.
4. La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT):  
NOM-141-SEMARNAT-2003

#### **1.5 Tipos de métodos constructivos en presas de jales**

Las presas de jales, al considerar el tipo de proceso constructivo del dique, se puede describir como el método aguas arriba, método aguas abajo, y método eje central. Los esquemas correspondientes a cada proceso constructivo se encuentran en el anexo 7 no normativo de la NOM- 141- SEMARNAT- 2003.

Para efectos de la zona en estudio en el Anexo AI de este informe se detalla el procedimiento constructivo actual y el que se tiene propuesto para la ampliación.



## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivos generales**

El presente informe tiene como finalidad obtener el análisis de estabilidad (estático y accidental por sismo) en una presa de jales que pretende sobre-elevarse, el análisis se realizará en condiciones a corto y a largo plazo, los resultados obtenidos del análisis deberán cumplir con los factores de seguridad recomendados por el Manual de Diseño de Obras Civiles (MOC, 2008), el cual considera que para el análisis estático se tengan factores de seguridad (FS) mayores o iguales a 1.5 y para la condición dinámica mayores o iguales a 1.1.

### **2.2 Objetivos particulares**

Conocer las pruebas que se llevaron a cabo en la campaña de exploración geotécnica que se realizó en el área de estudio.

Interpretar los resultados de laboratorio efectuados en el jal que se encuentra depositado y el jal que será colocado en la ampliación.

Asignar parámetros de resistencia a la presa actual y a la nueva conformación.

Efectuar el análisis de estabilidad en condiciones actuales y con la nueva geometría (ampliación).

## **3. Justificación**

El presente trabajo es parte de los estudios realizados por Flopac Ingeniería S.A. de C.V. para llevar a cabo el análisis de estabilidad de una presa de jales que pretende sobre-elevarse, ya que actualmente la planta de beneficio de una unidad minera ubicada al norte de México sigue operando, y requiere la ampliación del depósito de jales en donde realizan la deposición final de los jales, por lo que, se requiere de una serie de estudios de mecánica de suelos para poder definir un modelo geotécnico que permita realizar un análisis de estabilidad y determine si la zona de estudio es apta para la geometría de la ampliación que se propone.

#### 4. Descripción del proyecto

El depósito de jales que actualmente está en operación está construido con jales espigados, con el método "aguas arriba" (NOM-141-SEMARNAT-2003). Se construyó, en dos etapas: el bordo 1, ubicado en la zona norponiente del depósito se construyó en una primera fase y en este momento se encuentra muy consolidado y cementado; y la segunda etapa que está en operación actualmente, con un descanso debido a un paro técnico que lleva ya algunos meses.

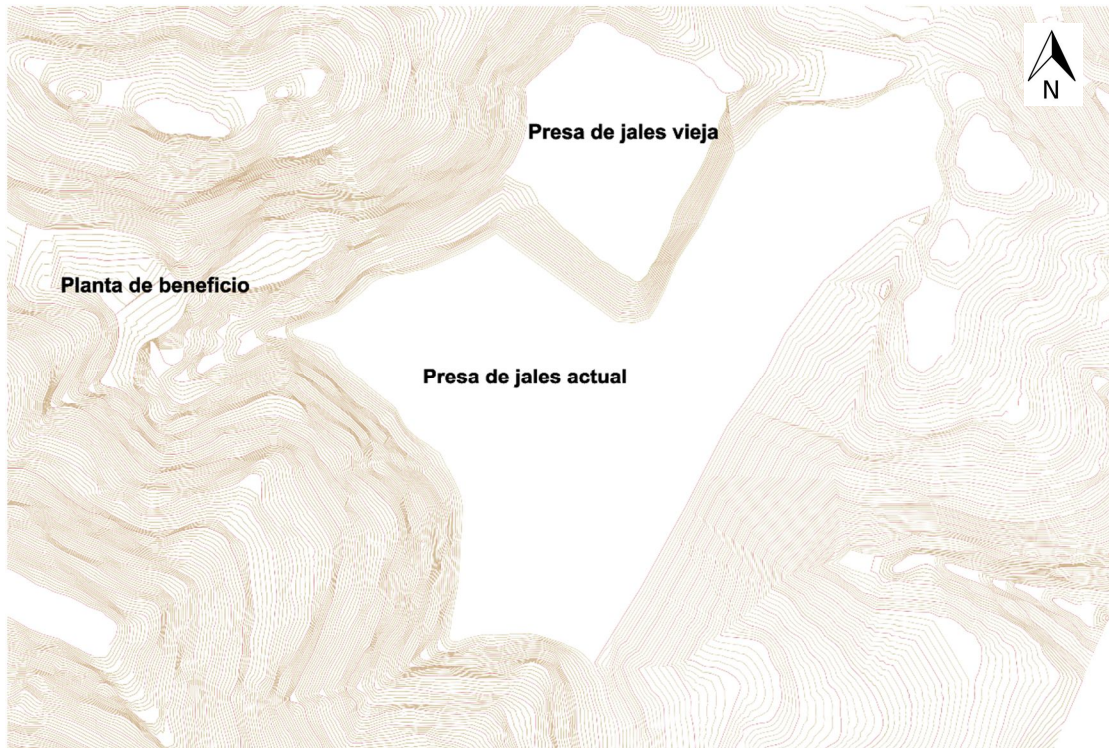


Figura 4.1. Localización en planta de la presa de jales actual. Flopac, 2015a.



Figura 4.2 Vista de la cara "aguas abajo" de la cortina del depósito de jales actual. Flopac, 2015a.



*Figura 4.3 Vista de la corona y la zona de playa del depósito actual. Flopac, 2015a.*



*Figura 4.4 Vista de "aguas arriba" de la cortina del depósito actual. Flopac, 2015a.*

Se pretende cambiar la técnica de deposición del jal, de espiguelo a jal integral prensado, por tanto, es necesario conocer las condiciones de estabilidad estática y accidental por sismo en la cota actual y hacer el análisis para conocer las condiciones de seguridad con la altura al cambiar el método de deposición. Esto implica realizar un estudio geotécnico del depósito, el cual debe incluir trabajos de campo y laboratorio de mecánica de suelos, de geofísica y de hidrología. Se hace necesario conocer los parámetros mecánicos del jal depositado y del jal que se depositará, además de definir las condiciones de humedad y compacidad con los que se debe colocar, para garantizar que las condiciones calculadas se acerquen en lo posible a las que se tengan en el depósito.

Se propuso construir un bordo iniciador unos metros "aguas abajo" (figura 4.5 y 4.6) del actual bordo iniciador, aprovechando que se forma una estrecha boquilla natural conformada por roca, construir con el mismo método como hasta ahora, sólo que la parte expuesta (la cara "aguas abajo") se haga con material de préstamo compactado para evitar la erosión eólica o pluvial y entre éste y la actual cara del depósito, con jal integral compactado.



A esta conformación se le dará forma de arco invertido para darle rigidez a la estructura y su geometría estará conformada por 8 bermas de anchos variables con alturas de 15 m, excepto la última que tendrá 10 m de altura. Para evitar la erosión sobre la cortina del depósito ésta se tendrá que revestir con el mismo material para el bordo iniciador, el revestimiento será de 2 m de espesor en las caras del talud y 0.50 m en las terrazas de cada una de las bermas. La figura 4.5 muestra la localización en planta la geometría propuesta.

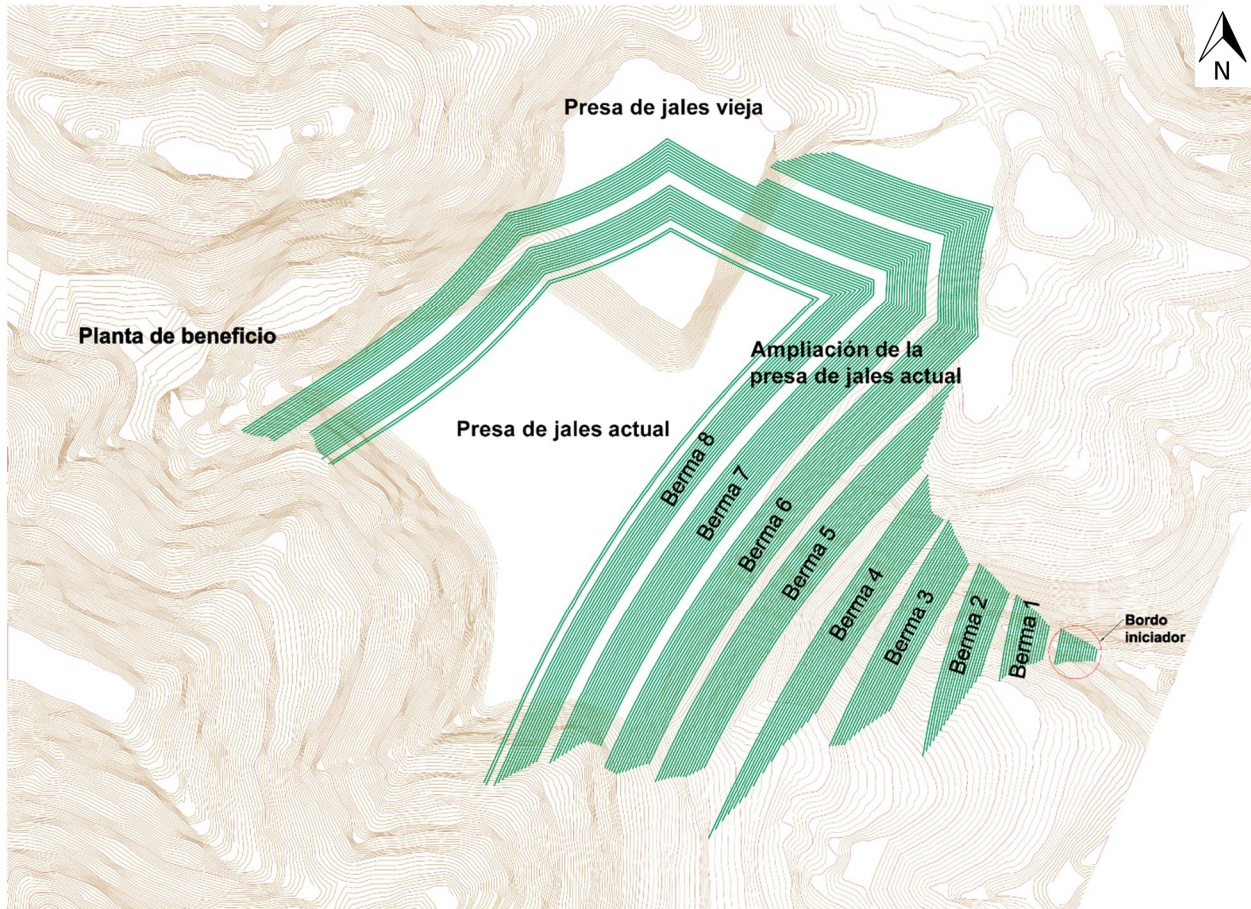


Figura 4.5 Localización en planta de la geometría de la ampliación. Flopac, 2015a.

Esta solución nos dará mayor alojamiento de jal, un muy buen empotramiento y protección a la zona expuesta contra la erosión.





Figura 4.6 Vista "aguas debajo" de la zona en donde se pretende colocar el bordo iniciador. Flopac, 2015.

A continuación se muestra los datos básicos de la presa de jales actual y la presa de jales vieja.

- Área total de la presa de jales actual = 88,40 m<sup>2</sup>
- Área de total de la presa de jales vieja = 20,397 m<sup>2</sup>.
- Elevación actual = 1,566.732 m.s.n.m.
- Elevación presa vieja = 1,584.271 m.s.n.m.
- Elevación inicial = 1,493 m.s.n.m.
- Elevación de la unidad = 1,595 m.s.n.m.
- Diferencia de elevación del piso de la presa actual con la presa vieja = 17.539 m<sup>2</sup>
- Diferencia de elevación de la presa actual con la unidad = 28.268 m.
- Elevación del bordo de contención actual = 1,569.37 m.s.n.m.
- Altura total de la superficie del bordo = 76.37 m.
- Longitud del bordo = 483 m.
- El incremento de la presa de jales anual es de 6.85 m promedio con producción de 1,200 toneladas diarias.

## 5. Trabajos en campo

Para poder llevar a cabo el análisis de estabilidad de una presa de jales que pretende sobre- elevarse, se llevó a cabo una campaña de exploración de mecánica de suelos que consto de 6 sondeos mixtos, 4 sondeos en roca, pruebas de permeabilidad tipo Lefranc/Lugeon, pruebas de ficómetro, y una campaña de exploración geofísica que consto de cuatro tendidos de refracción sísmica (TRS´s), dos vibraciones ambientales (VA´s), y un sondeo eléctrico vertical en arreglo Schlumberger (SEV).

De los tendidos de refracción sísmica se obtuvieron velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales del terreno, con las que se calcularon los módulos elásticos-dinámicos. A partir de la prueba de vibración ambiental se determinó el periodo característico del sitio de interés, y del sondeo eléctrico vertical se establecieron los valores de resistividad y se estimaron espesores de la estratigrafía somera que se asocia al sitio de estudio. También se construyó un espectro de diseño por sismo conforme al manual de CFE, 2008, para establecer los niveles de aceleración máximos esperados en la superficie del terreno para el sismo de colapso, considerando la actividad sísmica de la región y las condiciones locales de la respuesta del suelo.

### 5.1 Campaña de exploración de mecánica de suelos

Para poder caracterizar los materiales y obtener parámetros para el diseño del bordo y generar un modelo geotécnico para la ampliación del depósito de jales, se llevó a cabo una campaña de exploración de mecánica de suelos que consistió en (ver figura 5.1.1):

- 6 sondeos mixtos (SM).
- Sondeos en roca en los sondeos mixtos: 02, 03, 05 y 06.
- Pruebas de permeabilidad en los sondeos mixtos: 01, 03 y 05.
- Pruebas Lugeon en el sondeo PL-01.
- Pruebas de ficómetro en 3 de los sondeos mixtos: 01, 03 y 05.
- 3 Pozos de observación en los sondeos mixtos: 02,05 y 06.

Los 6 sondeos mixtos efectuados se realizaron empleando la técnica conocida como penetración estándar, combinada con pruebas de ficómetro para conocer las propiedades mecánicas *in situ* de los suelos y pruebas de permeabilidad para conocer su conductividad hidráulica en algunos de los sondeos (SM01, SM02, SM04, SM06), así como sondeos de avance y sondeos con piezocono.

Se colocaron 3 pozos de observación sobre el eje de la cortina actual, y se llevó a cabo un sondeo en roca (PL-01) para caracterizar la zona donde se desplantará el bordo iniciador para la ampliación del depósito.

La tabla 5.1.1 muestra los sondeos mixtos y las pruebas que se llevaron a cabo en cada uno de ellos, las tablas 5.1.2 a 5.1.4 muestran los resultados de las pruebas de ficómetro y permeabilidad (Lefranc y Lugeon), respectivamente.

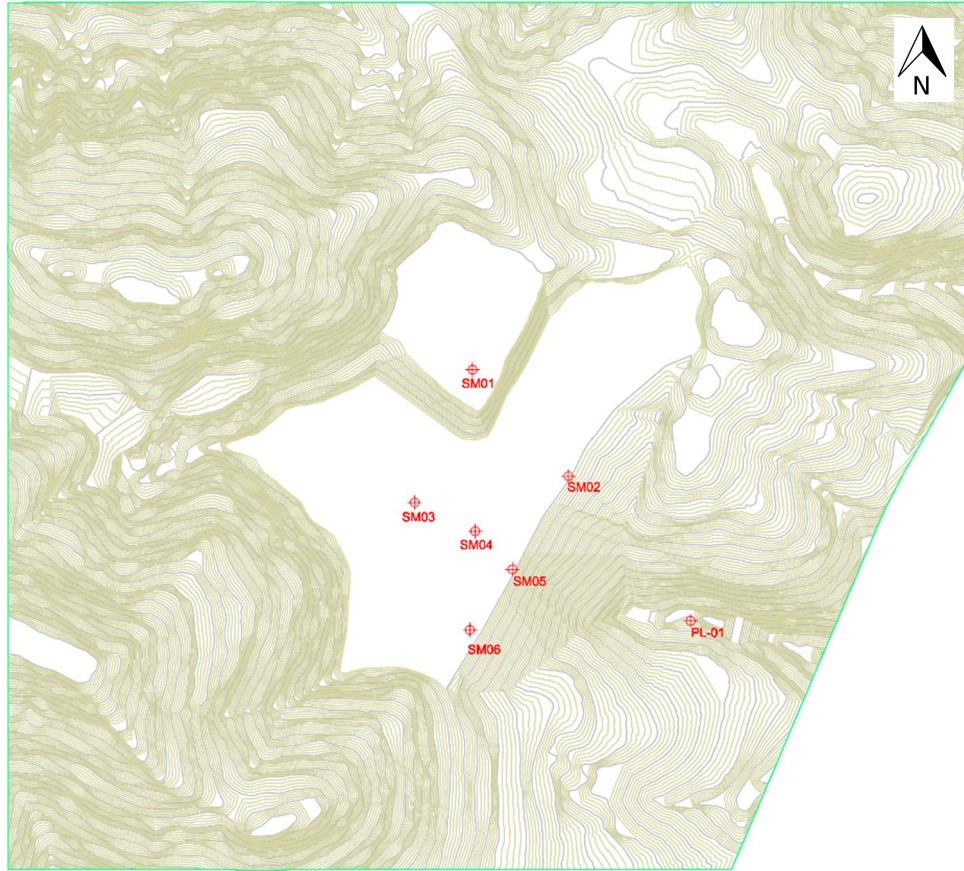


Figura 5.1.1 Localización de los sondeos mixtos. Flopac, 2015b.

Tabla 5.1.1 Sondeos, pruebas y trabajos realizados en la campaña de exploración de mecánica de suelos. Flopac, 2015b.

Sondeo	SPT	Prueba realizada					Pozo de observación
		P. Lefranc	P. Lugeon	Ficómetro	CPTu	RQD	
SM01	x	x		x			
SM02	x					x	x
SM03	x	x		x	x	x	
SM04	x						
SM05	x	x		x	x	x	x
SM06	x					x	x
PL-01			x			x	
Simbología SM: Sondeo mixto CPTu: Sondeo con piezocono SPT: Sondeo de penetración estándar RQD: Obtención del índice de calidad de roca							

Tabla 5.1.2 Resultados de las pruebas de permeabilidad tipo Lefranc. Flopac, 2015b.

Sondeo	Permeabilidad	
	Profundidad	k
	m	m/s
SM01	8.0	3.64E-07
	19.4	9.43E-08
	29.0	1.15E-07
	39.2	4.41E-08
SM03	9.2	1.15E-07
	19.0	2.00E-07
SM05	10.0	2.13E-07
	20.0	1.33E-08
	29.0	7.54E-08
	40.0	5.58E-08
	49.0	4.50E-08

Tabla 5.1.3 Resultados de las pruebas de permeabilidad tipo Lugeon. Flopac, 2015b.

Prueba lugeon (PL-01)				
Profundidad (m)		Permeabilidad k		
De	A	U.L.	<sup>(1)</sup> cm/s	<sup>(2)</sup> cm/s
8	12	0.1	5.10E-07	1.58E-07
18	21.5	0.1	5.83E-07	4.36E-08

U.L. Unidad Lugeon <sup>2</sup> según Custodio y Llamas (1996)  
<sup>1</sup> según González de Vallejo (2002)

Tabla 5.1.4 Resultados de las pruebas de ficómetro. Flopac, 2015b.

Sondeo	Ficómetro		
	Profundidad	C	$\phi$
	m	kg/cm <sup>2</sup>	°
SM01	8.0	0.78	42.1
	18.0	1.46	34.7
	28.0	3.36	35.5
	48.0	3.88	40.4
SM03	8.0	1.12	33.2
	18.0	0.98	45.3
SM05	8.0	0.54	37.1
	17.8	2.05	32.1
	30.4	2.50	34.9
	37.5	2.74	28.8
	48.0	2.42	30.9

Tabla 5.1.5 Resultados de las pruebas de compresión simple efectuadas en las muestras recuperadas de los sondeos de roca. Flopac, 2015b.

Sondeo	Muestra	Profundidad promedio	Resistencia a la compresión	Modulo de elasticidad	Peso volumetrico	Descripción de la roca
		m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	t/m <sup>3</sup>	
PL-01	1	14.43	564.06	281329	2.64	Caliza color gris
PL-02	2	26.67	457.70	404074	3.27	Caliza color gris
SM-03	3	45.40	388.12	179196	2.57	Caliza color gris
SM-03	4	49.25	343.37	493088	2.67	Conglomerado de color gris
SM-05	5	59.41	544.92	365726	2.63	Conglomerado de color gris
SM-05	6	59.30	232.50	499339	1.91	Conglomerado de color gris
SM-06	7	32.30	356.38	987120	2.65	Caliza color gris

Tabla 5.1.6 Resultados de la prueba de RQD efectuadas a las muestras de roca recuperadas de los sondeos de roca. Flopac, 2015b.

Sondeo	No. Caja	Profundidad	RQD
		m	%
SM-02	1	56.50-59.80	20.30
SM-03	1	44.40-46.63	62.33
SM-03	2	46.63-48.5	74.87
SM-03	3	48.50-50.00	38.00
SM-05	1	53.20-56.00	0.00
SM-05	2	56.00-59.40	20.29
SM-05	3	59.40-60.20	62.50
SM-06	1	31.90-34.10	45.00
SM-06	2	34.10-36.30	44.09
PL-01	1	1.00-4.00	11.67
PL-01	2	4.00-7.00	16.33
PL-01	3	7.00-10.00	73.93
PL-01	4	10.00-13.00	94.13
PL-01	5	13.00-16.00	99.33
PL-01	6	16.00-19.00	75.63
PL-01	7	19.00-22.00	96.67
PL-01	8	22.00-25.00	99.00



## 5.2 Campaña de exploración geofísica

Como parte integral de la caracterización geotécnica del depósito de jales, se requirió realizar un estudio geofísico, que constó de diversas pruebas distribuidas dentro del área de estudio, mismas que se detallan en este apartado.

Así mismo se muestran y describen los resultados obtenidos de cada prospección, con el objeto de dar a conocer las condiciones y características del subsuelo explorado, a partir de los datos recolectados de cuatro tendidos de refracción sísmica (TRS), dos vibraciones ambientales (VA) y un sondeo eléctrico vertical (SEV) en arreglo Schlumberger. En base al TRS se obtuvieron las velocidades de propagación de ondas longitudinales y transversales del terreno, con las que se calculan los módulos elásticos-dinámicos. A partir de la prueba de vibración ambiental se determinó el periodo característico del sitio de interés. El sondeo eléctrico vertical, permitió establecer los valores de resistividad y estimar los espesores de la estratigrafía somera que se asocia al sitio de estudio.

Finalmente, se construyó un espectro de diseño por sismo conforme al manual de CFE, 2008, para establecer los niveles de aceleración máxima esperados en la superficie del terreno para el sismo de colapso, considerando la actividad sísmica de la región y las condiciones locales de la respuesta del suelo.

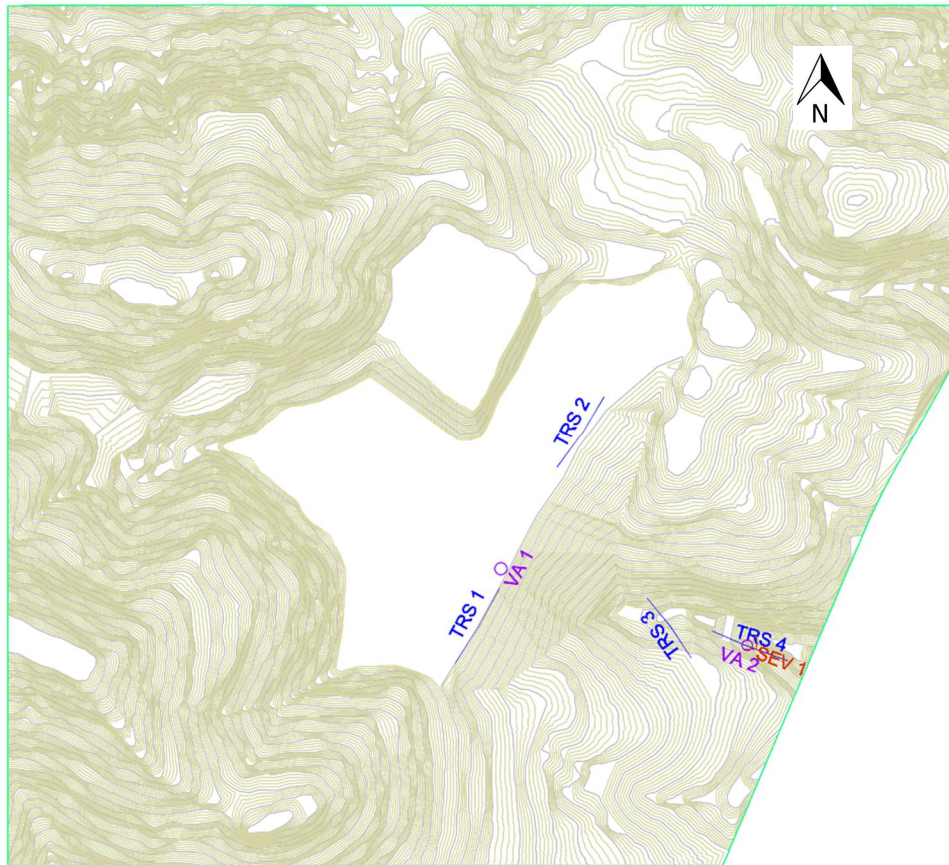


Figura. 5.2.1 Localización general de los sondeos geofísicos. Flopac, 2015c.

Los trabajos de geofísica consistieron en la ejecución de las siguientes actividades:

### 5.2.1 Vibración Ambiental (VA1 – VA2).

Se realizaron dos monitoreos de microtremores, con una ventana de tiempo de 20 min, para obtener la frecuencia fundamental y por tanto el periodo característico del suelo  $T_s$  [Hz].

Las figuras 5.2.1.1 y 5.2.2.1 muestran el resultado obtenido del procesamiento de los registros de VA.

Tabla 5.2.1.1 Periodos dominantes del sitio. Flopac, 2015c.

Sitio de VA	Frecuencia característica	Periodo dominante
VA1	2.53 Hz	0.40 s
VA2	46.13 Hz	0.02 s

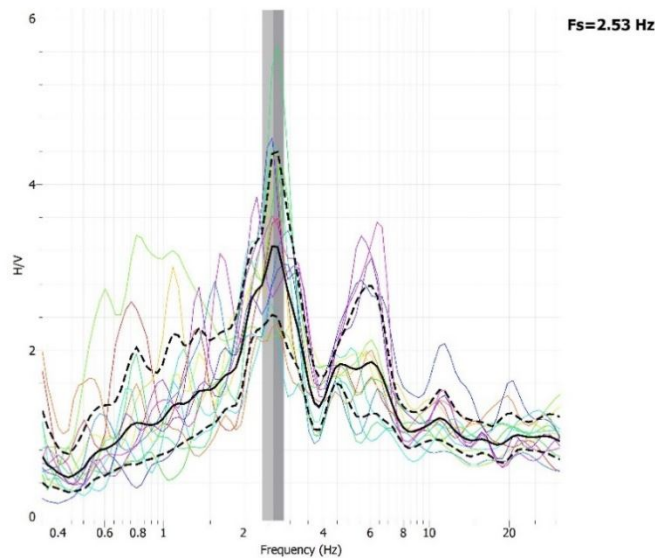


Figura. 5.2.1.1 Cocientes espectrales H/V obtenidos a partir de la VA 1  $F_s=2.53$  Hz y  $T_s=0.40$  s. Flopac, 2015c.

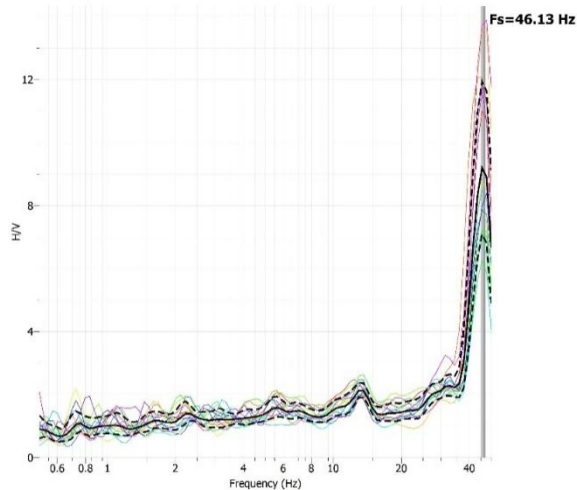


Figura. 5.2.1.2 Cocientes espectrales H/V obtenidos a partir de la VA 2  
 $F_s=46.13$  Hz y  $T_s=0.02$  s. Flopac, 2015c.

## 5.2.2 Sondeo Eléctrico Vertical (SEV 1).

Se efectuó un sondeo en arreglo tipo Schlumberger a partir del cual se obtuvo una distribución de Isorresistividad del subsuelo en el sitio de interés, con el fin de determinar los estratos y/o capas del subsuelo en función de sus resistividades eléctricas.

Este sondeo se ubica en la parte sureste del área de estudio y como se observa en el perfil (figura 5.2.2.1.) alcanza una profundidad media de investigación de 100 m, dadas las aberturas interelectródicas implementadas. En el sondeo se distinguen 3 unidades geoelectricas que constituyen el subsuelo del sitio.

La primera unidad se asocia a roca caliza intemperizada y presenta valores de resistividad en un rango de 4,600 a 7,000  $\Omega.m$ , con un espesor aproximado de 3 m. La segunda unidad se asocia a roca caliza sana y presenta valores de resistividad en un rango de 2,000 a 4,300  $\Omega.m$ , subyace a 3 m de profundidad aproximadamente y posee un espesor aproximado de 15 m. La tercera unidad se asocia a roca caliza fracturada y presenta valores de resistividad, en un rango de 4,500 a 6,200  $\Omega.m$ , subyace a 15 m de profundidad aproximadamente y posee un espesor indefinido por esta metodología.

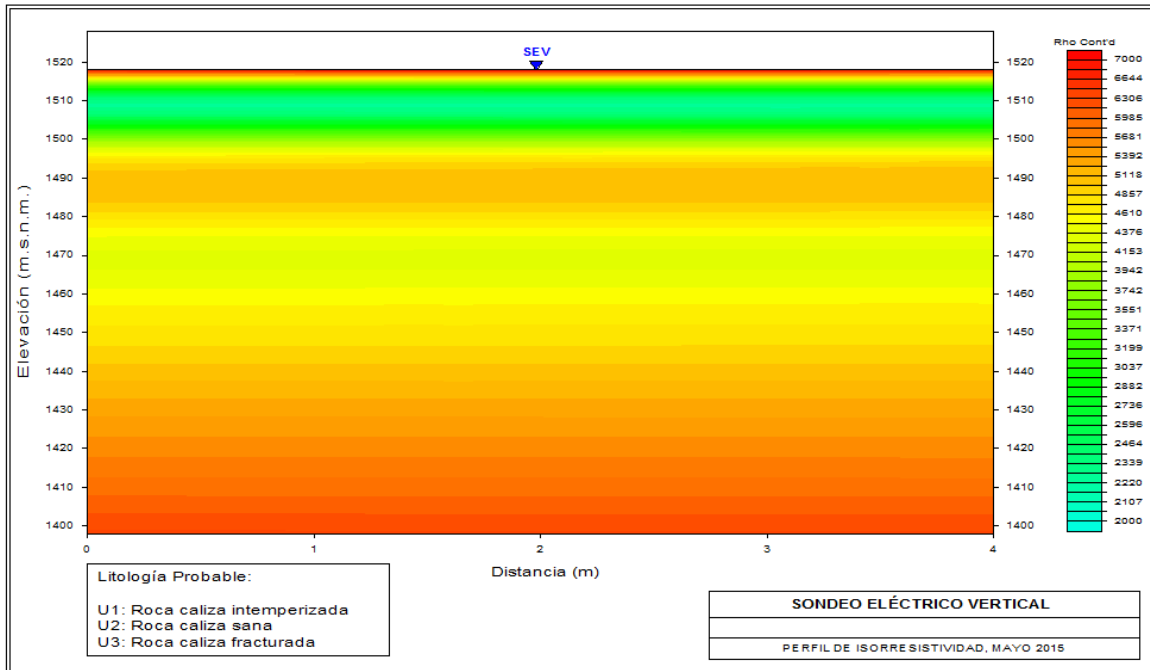


Figura. 5.2.2.1 Perfil del sondeo eléctrico vertical No.1. Flopac, 2015c.

### 5.2.3 Tendido de Refracción Sísmica (TRS).

Se efectuaron 4 tendidos de refracción sísmica con una longitud total de 96 m, de 12 geófonos equiespaciados a 8 m, y cuya profundidad media de investigación se encuentra en el orden de 30 m, suficientes para caracterizar el subsuelo, en función de los objetivos planteados.

Para cada uno de los 4 tendidos de refracción sísmica realizados, se obtuvieron las secciones sismoestratigráficas para cada sitio de interés y se calcularon los módulos elásticos-dinámicos asociados a cada sección.

A continuación se describe cada una de las secciones sismoestratigráficas, obtenidas de los tendidos de refracción sísmica.

#### 5.2.3.1 TRS 1

Se ubica al suroeste del área de estudio (borde superior del depósito). En esta sección se observan tres unidades sismoestratigráficas, las cuales se diferencian por los valores de velocidad de onda longitudinal y de corte. La primera unidad se asocia a depósitos de jales compactos, posee un espesor promedio de 8.5 m, y se encuentra desde la superficie; así mismo, tiene valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de 408 m/s y 172 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como 100 % arable. La segunda unidad subyace a una profundidad aproximada de 8.5 m y hasta 20 m, es decir tiene un espesor promedio de 12 m y se asocia a depósitos de jales muy compactos dado que posee valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de: 460 m/s y 208 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como 100% arable. Finalmente se



encuentra la tercera unidad asociada a jales, que subyace a una profundidad aproximada de 20 m y cuyo espesor es indefinido por esta metodología, presenta valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de: 725 m/s y 350 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como 100 % arable.

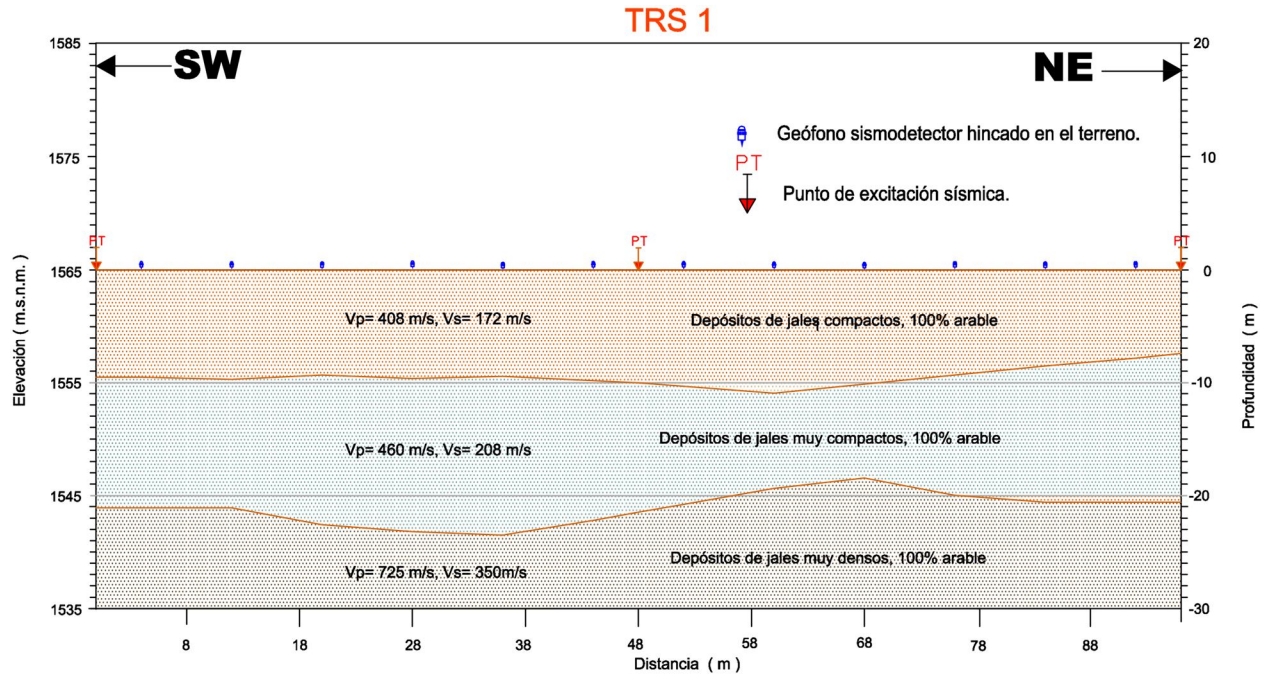


Figura. 5.2.3.1.1 Sección sismoestratigráfica del tendido de refracción sísmica No.1. Flopac, 2015c.

### 5.2.3.2 TRS 2

Se ubica al noroeste, en la zona central del área de estudio (borde superior del depósito). De forma correlacionable a la sección anterior, en esta sección se observan tres unidades sismoestratigráficas, las cuales se diferencian por los valores de velocidad de onda longitudinal y de corte. La primera unidad se asocia a depósitos de jales compactos, posee un espesor promedio de 7 m, y se encuentra desde la superficie; así mismo, tiene valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de 342 m/s y 170 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como 100 % arable. La segunda unidad subyace a una profundidad media aproximada de 7 m y hasta 22 m, es decir tiene un espesor promedio de 15 m y se asocia a depósitos de jales muy compactos dado que posee valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de: 477 m/s y 220 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como 100 % arable. Finalmente se encuentra la tercera unidad asociada a depósitos de jales muy densos, que subyace a una profundidad aproximada de 22 m y cuyo espesor es indefinido por esta metodología, presenta valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de: 930 m/s y 437 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como 100 % arable.

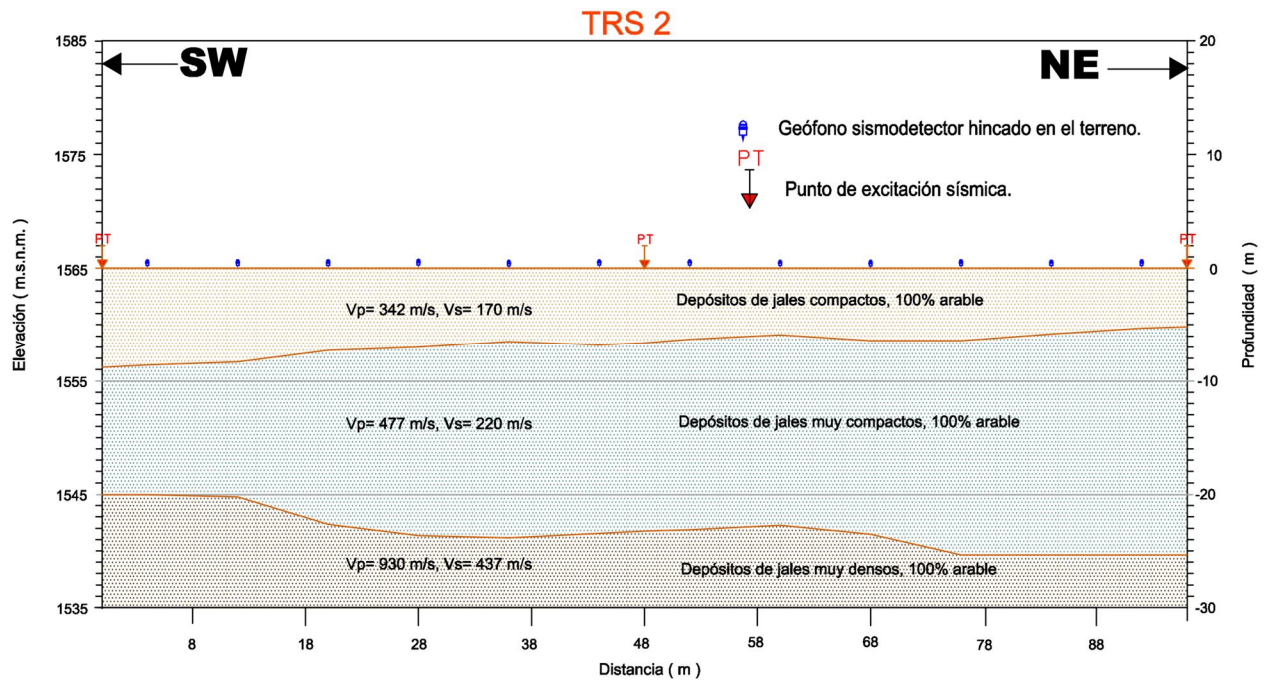


Figura. 5.2.3.2.1 Sección sismoestratigráfica del tendido de refracción sísmica No.2. Flopac, 2015c.

### 5.2.3.3 TRS 3

Se ubica al sur del área que corresponde a la parte inferior del depósito. En el modelo sismoestratigráfico obtenido se observan dos unidades, que se diferencian por los valores de velocidad de onda longitudinal y de corte. La primera unidad que se encuentra desde la superficie, se asocia a roca caliza muy intemperizada, posee un espesor promedio de 10 m, está unidad se acuña hacia el NW; así mismo, tiene valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de 2,272 m/s y 953 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como arable con bajo rendimiento. La segunda unidad subyace a una profundidad media aproximada de 10 m y posee un espesor indefinido por esta metodología, aflorando en superficie hacia el NW de la sección, ésta unidad muestra valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de: 5,337 m/s y 2,976 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como no arable.

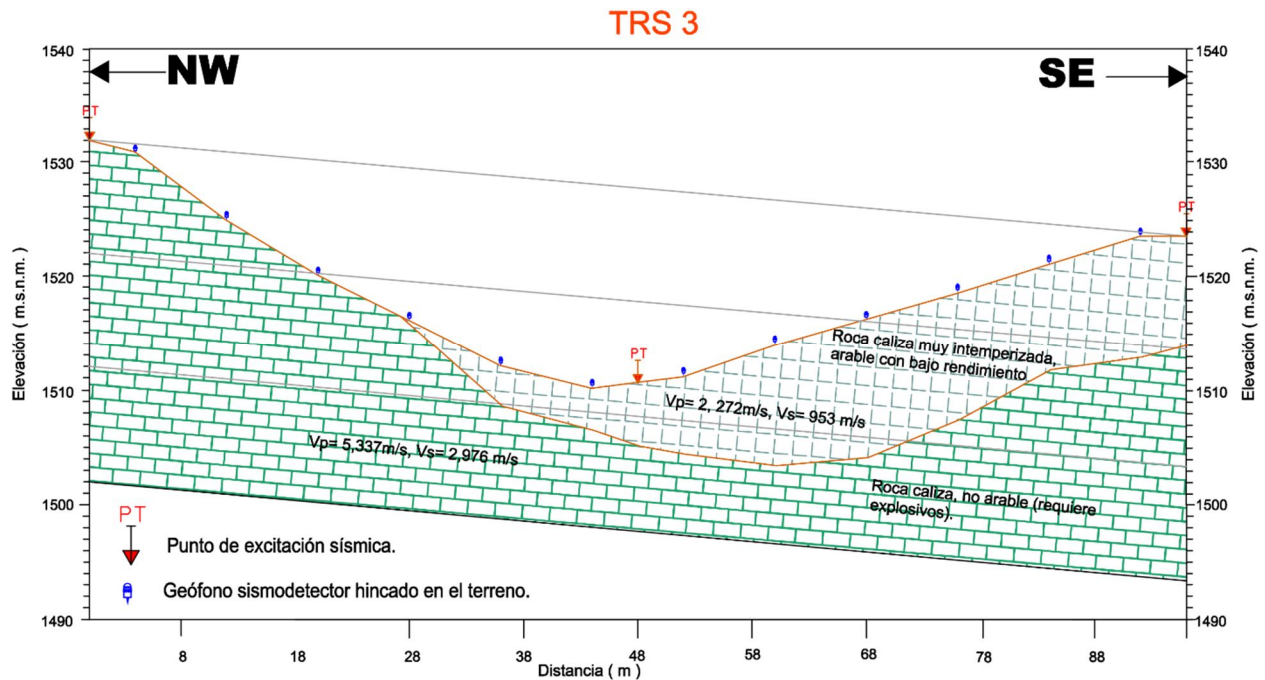


Figura. 5.2.3.3.1 Sección sismoestratigráfica del tendido de refracción sísmica No.3. Flopac, 2015c.

#### 5.2.3.4 TRS 4

Se ubica al sur, en la zona central del área de estudio (borde superior del depósito). En esta sección se observan tres unidades sismoestratigráficas, las cuales se diferencian por los valores de velocidad de onda longitudinal y de corte. La primera unidad se asocia a roca caliza intemperizada, posee un espesor promedio de 3 m, y se encuentra desde la superficie en la parte NW de la sección; así mismo, tiene valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de 2,354 m/s y 1,123 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como arable con bajo rendimiento. La segunda unidad se encuentra desde superficie en la parte SE de la sección y posee un espesor promedio de 3 m y se asocia a roca caliza muy intemperizada con materiales aluviales dado que posee valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de: 1,231 m/s y 486 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como 100 % arable. Finalmente se tiene una tercera unidad asociada a roca caliza, que subyace a una profundidad aproximada de 3 m y cuyo espesor es indefinido por esta metodología, presenta valores de velocidad de onda longitudinal y de corte de: 5,552 m/s y 3,112 m/s, respectivamente, por lo que se clasifica como no arable.

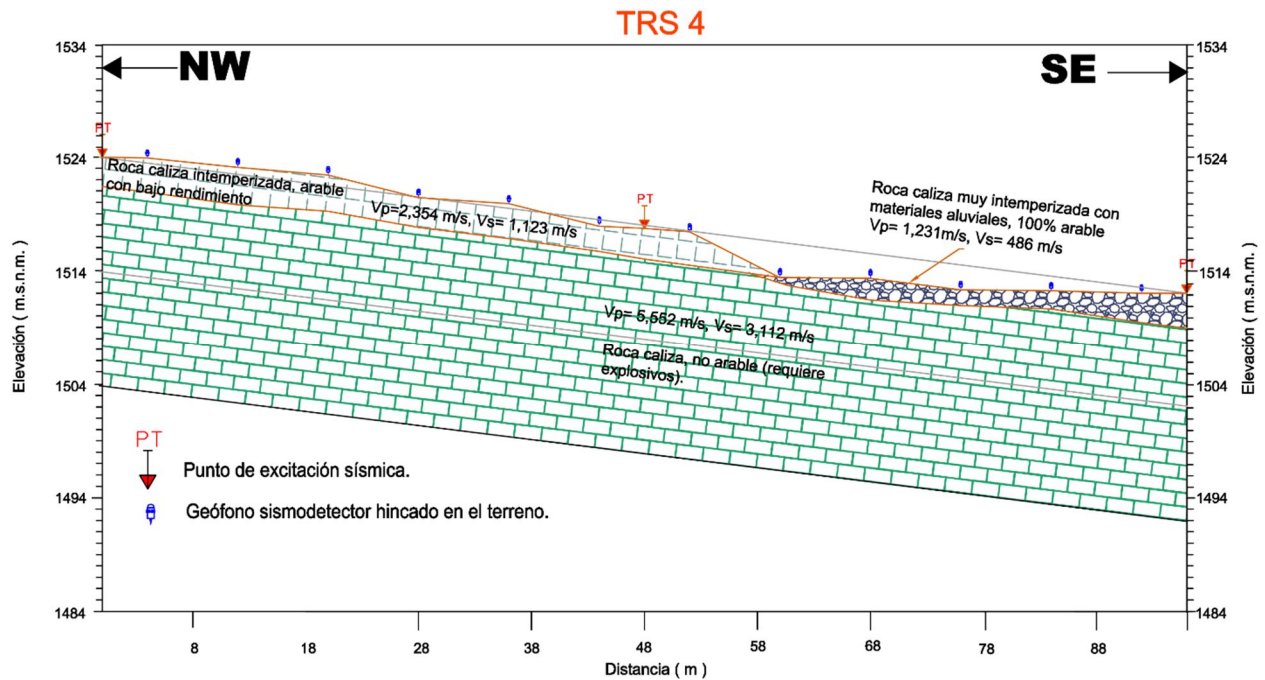


Figura. 5.2.3.4.1 Sección sismoestratigráfica del tendido de refracción sísmica No.4. Flopac, 2015c.

Mediante el análisis de cada uno de los sismogramas obtenidos, fue posible determinar los tiempos de arribo de las ondas longitudinales (P) y de corte (S), de las diferentes unidades sismoestratigráficas que constituyen el subsuelo somero del sitio. Con ello se determinaron los módulos de elasticidad dinámicos de los materiales presentes en el subsuelo de cada TRS, mismos que se indican en las siguientes tablas.

Tabla 5.2.3.1 Propiedades dinámicas del TRS 1. Flopac, 2015c.

Capa	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (ton/m <sup>3</sup> )	Relación de Poisson	Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
1	408	172	1.6	0.39	483	1,343
2	460	208	1.7	0.37	750	2,057
3	725	350	1.8	0.35	2,248	6,060



Tabla 5.2.3.2 Propiedades dinámicas del TRS 2. Flopac, 2015c.

Capa	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (ton/m <sup>3</sup> )	Relación de Poissón	Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
1	342	170	1.6	0.34	471	1,259
2	477	220	1.7	0.36	839	2,290
3	930	437	1.8	0.36	3,504	9,519

Tabla 5.2.3.3 Propiedades dinámicas del TRS 3. Flopac, 2015c.

Capa	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (ton/m <sup>3</sup> )	Relación de Poissón	Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
1	2272	953	2.2	0.39	20,368	56,754
2	5337	2,976	2.4	0.27	216,675	552,251

Tabla 5.2.3.4 Propiedades dinámicas del TRS 4. Flopac, 2015c.

Capa	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (ton/m <sup>3</sup> )	Relación de Poissón	Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
1	2,354	1,123	2.2	0.35	28,282	76,513
2	1,231	486	2	0.41	4,815	13,557
3	5,552	3,112	2.4	0.27	236,931	602,252

Nota: se destaca que los valores de densidad son valores aproximados.

### 5.2.4 Espectro de diseño

Con los resultados de los trabajos realizados, se procedió a realizar un espectro de diseño representativo del área de estudio, con base en el "Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Sismo Ed.2008", y el programa PRODISIS , actualización de la versión 2.0, incluida en el mismo manual de diseño por sismo.

Tabla 5.2.4.1 Parámetros que definen la forma del espectro de diseño para  $Q=1$ . Flopac, 2015c.

Modelo	$a_0$	$c$	$T_a$	$T_b$	$T_c$	$k$	$r$	$\beta$
	[g]	[g]	[s]	[s]	[s]			
CFE 2008	0.049	0.165	0.1	0.6	2.0	1.5	0.5	1

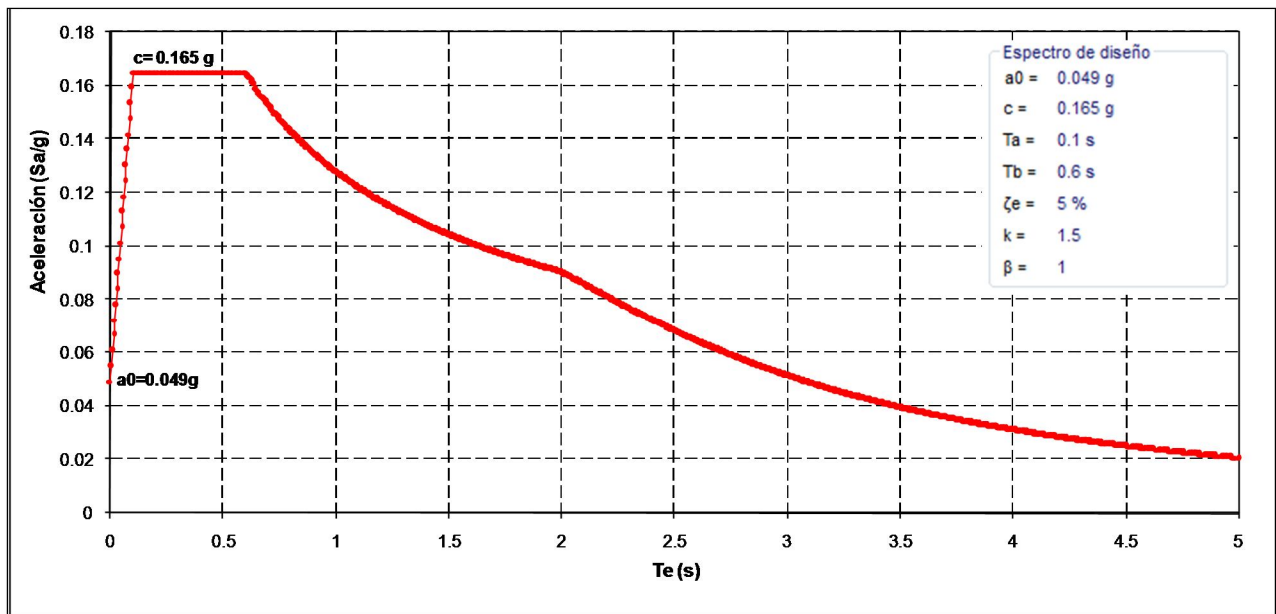


Figura. 5.2.4. Espectro de Diseño Sísmico transparente. Manual de Diseño por Sismo de CFE, 2008. Flopac, 2015c.

Tabla 5.2.4.2 Parámetros para la construcción del espectro de diseño sísmico sugerido. Flopac, 2015c.

Modelo	$a_0$	$c$	$T_a$	$T_b$	$T_c$	$k$	$r$	$\beta$
	[g]	[g]	[s]	[s]	[s]			
CFE 2008	0.0245	0.0825	0.1	0.6	2.0	1.5	0.5	1

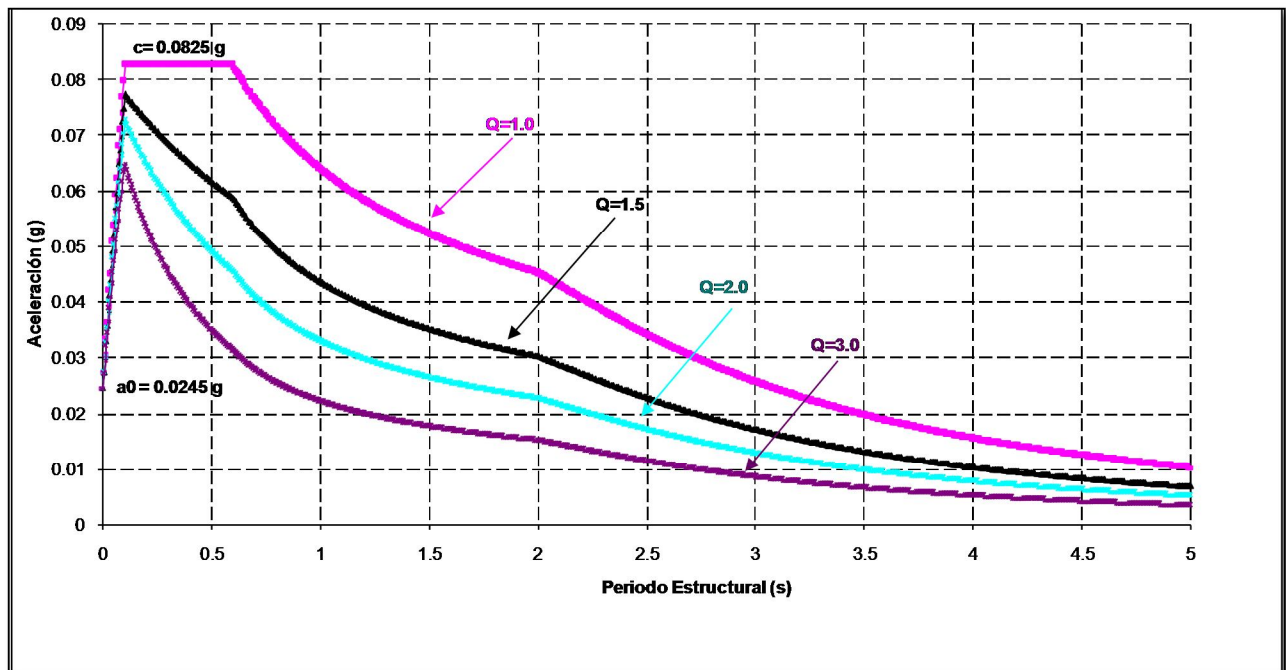


Figura 5.2.4.2 Espectros de Diseño Sísmico recomendados. Manual de diseño por sismo de CFE, 2008. Flopac, 2015c.

## 6. Trabajos en laboratorio

Para poder definir los parámetros que se emplearán en el análisis de estabilidad, se realizaron pruebas de laboratorio a las muestras extraídas de los sondeos mixtos y al jal que será colocado en la ampliación, las pruebas consistieron en la determinación de propiedades índices (contenidos de agua, pesos volumétricos húmedos, densidad específica de los sólidos, granulometría, contenido de finos, límites consistencia, clasificación SUCS) y pruebas mecánicas (triaxiales tipo UU).

### 6.1 Resultados de las propiedades índices y pruebas mecánicas del jal que se colocará en la ampliación

La planta de beneficio utilizará filtros prensa, los cuales se pretende extraigan el material con el menor porcentaje de agua posible, motivo por el cual se determinará que valores de contenido de agua y peso volumétrico son los más adecuados para alcanzar los valores óptimos de humedad y compactación. Para obtener éstos valores fue necesario realizar estudios de laboratorio al jal integral que permitió su caracterización mecánica y la determinación las propiedades índices y granulométricas del material y con éstos su clasificación SUCS. Las pruebas índice realizadas para la determinación de las características físicas del material encontrado son: granulometría, densidad específica de sólidos y contenido natural de agua.

Para conocer sus parámetros mecánicos se realizaron ensayos triaxiales del tipo UU (no consolidada no drenada) a muestras reconstituidas, variando su contenido de agua y su compacidad.

A continuación en la tabla 6.1.1 se muestran los resultados las propiedades índice y las pruebas mecánicas que se le realizaron al jal que será colocado en la ampliación y en la tabla 6.1.2 se muestran los resultados de las pruebas mecánicas (triaxiales tipo UU).

*Tabla 6.1.1 Resultados de las propiedades índices del jal para la ampliación.  
Flopac, 2015d.*

Resultados de las pruebas índice										
Tipo de material	Contenido de agua (w) %	Densidad de sólidos	Granulometría			Peso volumétrico ton/m <sup>3</sup>	Límites de consistencia		Clasificación SUCS	Observaciones
			Grava %	Arena %	Finos %		LL %	LP %		
Jal	61.4	2.92	0	38.8	61.2	1.7	-	-	Probable limo arenoso	El material no se pudo clasificar debido a su poca plasticidad.



Tabla 6.1.2 Resultado de pruebas triaxiales. Flopac, 2015d.

Muestra	Peso de pisón kg	Datos de la probeta						Relaciones volumétricas													
		D <sub>m</sub> cm	H <sub>m</sub> cm	W <sub>m</sub> g	w %	A cm <sup>2</sup>	G <sub>s</sub>	V <sub>m</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>w</sub> g	W <sub>t</sub> g	V <sub>v</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>s</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>a</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>v</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>s</sub> cm <sup>3</sup>	e	C	G <sub>w</sub> %	γ <sub>m</sub> t/m <sup>3</sup>	φ °	c kg/cm <sup>2</sup>
						A <sub>m</sub> = π r <sup>2</sup>	V = AH <sub>m</sub>	W <sub>w</sub> = W <sub>w</sub>	W <sub>s</sub> = W <sub>m</sub> /(1+w)	V <sub>v</sub> = W <sub>v</sub> /(G <sub>s</sub> γ <sub>w</sub> )	V <sub>s</sub> = V - V <sub>v</sub>	V <sub>a</sub> = V <sub>v</sub> γ <sub>w</sub>	V <sub>v</sub> = V <sub>v</sub> γ <sub>w</sub>	V <sub>s</sub> = V - V <sub>v</sub>	e = W <sub>v</sub> /V <sub>s</sub>	C = e/(1+e)	G <sub>w</sub> = V <sub>w</sub> /V <sub>s</sub>	γ <sub>m</sub> = W <sub>m</sub> /V <sub>s</sub>			
W10-2K-100-UU	2.0	3.6	9.0	146.3	10	10.179	2.920	91.609	13.300	133.000	45.548	46.061	13.300	32.761	1.011	0.503	28.875	1.597	30	0.05	
W10-2K-150-UU				147.3					0.000	147.300	50.445	41.164	0.000	41.164	0.816	0.449	0.000	1.608			
W10-2K-200-UU				146.5					0.000	146.500	50.171	41.438	0.000	41.438	0.826	0.452	0.000	1.599			
W10-3K-50-UU	3.0	3.6	9.0	155.0	10	10.179	2.920	91.609	14.600	146.000	50.000	41.609	14.600	27.009	0.832	0.454	35.089	1.753	29	0.07	
W10-3K-100-UU				160.6					0.000	160.600	50.000	41.609	0.000	41.609	0.889	0.471	32.860	1.701			
W10-3K-150-UU				155.8					0.000	155.800	50.000	41.609	0.000	41.609	0.889	0.471	32.860	1.701			
W12-3K-50-UU	3.0	3.6	9.0	159.6	12	10.179	2.920	91.609	17.100	142.500	48.801	42.807	17.100	25.707	0.877	0.467	39.946	1.742	31	0.05	
W12-3K-100-UU				163.0					17.464	145.536	49.841	41.768	17.464	24.304	0.838	0.456	41.813	1.779			
W12-3K-150-UU				161.9					17.346	144.554	49.505	42.104	17.346	24.758	0.851	0.460	41.199	1.767			
W14-2K-50-UU	2.0	3.6	9.0	169.7	14	10.179	2.920	91.609	20.840	148.860	50.979	40.630	20.840	19.789	0.797	0.444	51.294	1.852	31	0.10	
W14-2K-100-UU				164.4					20.189	144.211	49.387	42.222	20.189	22.032	0.855	0.461	47.818	1.795			
W14-2K-150-UU				177.7					21.823	155.877	53.383	38.226	21.823	16.403	0.716	0.417	57.089	1.940			
W14-3K-50-UU	2.0	3.6	9.0	179.7	14	10.179	2.920	91.609	22.068	157.632	53.983	37.625	22.068	15.557	0.697	0.411	58.653	1.962	33	0.00	
W14-3K-100-UU				174.8					21.467	153.333	52.511	39.097	21.467	17.631	0.745	0.427	54.906	1.908			
W14-3K-150-UU				176.4					21.663	154.737	52.992	38.617	21.663	16.954	0.729	0.422	56.098	1.926			
W16-3K-50-UU	3.0	3.6	9.0	197.7	16	10.179	2.920	91.609	27.269	170.431	58.367	33.242	27.269	5.973	0.570	0.363	82.032	2.158	32	0.05	
W16-3K-100-UU				199.5					27.517	171.983	58.898	32.711	27.517	5.193	0.555	0.357	84.123	2.178			
W16-3K-150-UU				200.1					27.600	172.500	59.075	32.533	27.600	4.933	0.551	0.355	84.836	2.184			
W18-2K-100-UU	2.0	3.6	9.0	201.2	18	10.179	2.920	91.609	30.692	170.508	58.393	33.216	30.692	2.524	0.569	0.363	92.401	2.196	-	-	
W18-2K-150-UU				196.9					30.036	166.864	57.145	34.463	30.036	4.428	0.603	0.376	87.152	2.149			
W18-2K-200-UU				198.3					30.249	168.051	57.552	34.057	30.249	3.808	0.592	0.372	88.819	2.165			
W18-3K-50-UU	3.0	3.6	9.0	201.5	18	10.179	2.920	91.609	30.737	170.763	58.480	33.128	30.737	2.991	0.566	0.362	92.782	2.200	7	0.10	
W18-3K-100-UU				199.1					30.371	168.729	57.784	33.825	30.371	3.454	0.585	0.369	89.789	2.173			
W18-3K-150-UU				200.0					30.508	169.492	58.045	33.564	30.508	3.055	0.578	0.366	90.897	2.183			

Donde:  
 D Diámetro de la muestra  
 H Altura de la muestra  
 W<sub>m</sub> Peso de la muestra  
 A Área de la muestra  
 G<sub>s</sub> Densidad relativa de sólidos  
 V<sub>m</sub> Volumen de la muestra  
 W<sub>w</sub> Peso del agua  
 W<sub>s</sub> Peso de la fase sólida  
 V<sub>v</sub> Volumen de la fase sólida  
 V<sub>v</sub> Volumen de vacíos  
 V<sub>v</sub> Volumen del agua  
 V<sub>a</sub> Volumen del aire  
 e Relación de vacíos  
 C Concentración de sólidos  
 G<sub>w</sub> Grado de saturación de agua  
 γ<sub>m</sub> Peso específico de la muestra  
 φ Ángulo de fricción  
 c Cohesión  
 \* No se pudo conformar la probeta debido al alto contenido de agua

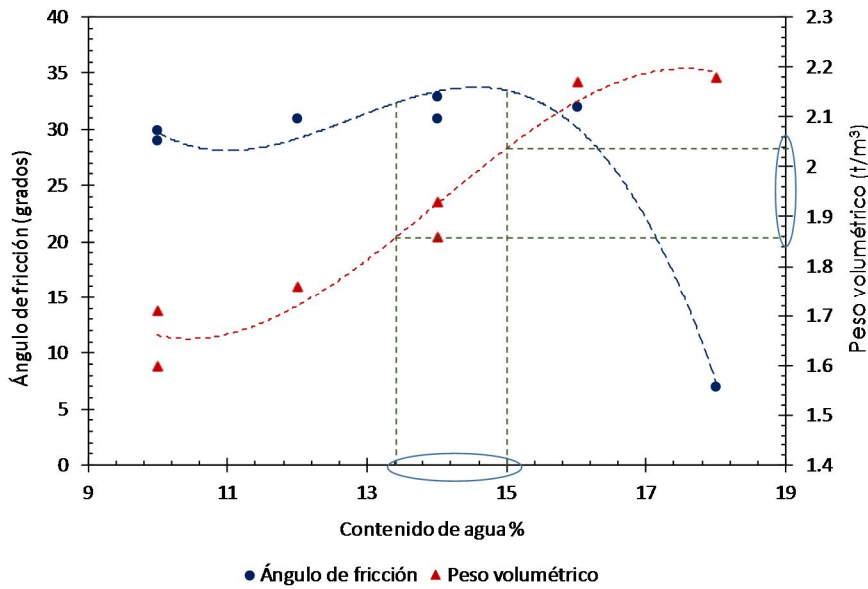


Figura 6.1.1 Representación gráfica de los resultados de las pruebas triaxiales. Flopac, 2015d.

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 6.1.2, en la figura 6.1.1 se puede apreciar cómo el ángulo de fricción tiene a subir conforme se incrementa el contenido de agua, en el intervalo de 10 a 15%. Al rebasar este valor, entre 15 y 18%, el ángulo de fricción disminuye hasta llegar a 7°. Por lo que se puede apreciar, el intervalo de humedad adecuado para la colocación del jal está entre

13.5 y posiblemente 15%, con peso volumétrico entre 1.86 y 2.02 t/m<sup>3</sup>. Estos valores de humedad y volumetría son los que se deben buscar durante la conformación del depósito.

## 6.2 Resultados de las pruebas de laboratorio efectuadas en los sondeos llevados a cabo sobre el depósito actual.

Se realizaron pruebas de laboratorio a las muestras alteradas e inalteradas recuperadas de los sondeos mixtos. De las muestras alteradas recuperadas del ensayo SPT se obtuvieron sus propiedades índice (contenido de agua, densidad de sólidos, porcentaje de finos, límites de consistencia) y de las muestras inalteradas (tubo Shelby), se realizaron propiedades índice y pruebas mecánicas (ensayos triaxiales tipo UU).

En las tablas 6.2.1 a la 6.2.6 se presentan las propiedades índice, volumétricas, y resultados de los sondeos mixtos, las tablas 6.2.4 a 6.2.6 muestran los resultados de las pruebas índice y pruebas triaxiales realizadas en las muestras recuperadas de los tubos Shelby y en las figuras 6.2.1 a 6.2.11 se muestran los perfiles estratigráficos de los sondeos mixtos, integrando los resultados de pruebas de permeabilidad, ficómetro, ensayos triaxiales, etc.

Tabla 6.2.1 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mixto 01. Flopac, 2015e.

Sondeo	Muestra	Profundidad		Propiedades índice								SUCS	
		de m	a m	w %	G %	S %	F %	w <sub>L</sub> %	w <sub>P</sub> %	PI %	G <sub>s</sub>		
SM-01	2	0.60	1.20	17.71	31.20	34.15	34.65	21.97	11.11	10.86	3.16	SC	Arena arcillosa con grava
SM-01	10	5.40	6.00	13.79	0.00	2.50	97.50	-	-	-	3.02	NC	
SM-01	15 P.S.	8.40	9.00	19.53	0.00	30.00	70.00	-	-	-	3.09	NC	
SM-01	15 P.I.	8.40	9.00	19.53	0.00	1.80	98.20	-	-	-	2.90	NC	
SM-01	18	10.20	10.80	19.53	1.15	11.00	87.85	-	-	-	2.97	NC	
SM-01	25	15.60	16.20	16.82	0.00	7.25	92.75	-	-	-	2.95	NC	
SM-01	30	19.20	19.80	19.82	0.00	0.85	99.15	-	-	-	2.91	NC	
SM-01	33	21.00	21.60	16.64	0.00	7.85	92.15	-	-	-	3.14	NC	
SM-01	41	25.80	26.40	21.53	0.00	2.07	97.93	-	-	-	2.96	NC	
SM-01	46	28.80	29.40	16.52	0.00	8.50	91.50	-	-	-	2.97	NC	
SM-01	49	30.60	31.20	24.42	0.00	2.05	97.95	-	-	-	2.96	NC	
SM-01	55	34.20	34.80	22.10	0.00	1.30	98.70	-	-	-	3.02	NC	
SM-01	59	36.60	37.20	17.57	0.00	1.00	99.00	-	-	-	3.05	NC	
SM-01	62	38.40	39.00	26.92	0.00	2.25	97.75	-	-	-	2.96	NC	
SM-01	68	42.00	42.60	21.87	0.00	3.20	96.80	-	-	-	3.02	NC	
SM-01	73	45.00	45.60	19.27	0.00	0.50	99.50	-	-	-	3.07	NC	
SM-01	78	48.00	48.60	23.55	0.00	0.10	99.90	-	-	-	3.06	NC	

Simbología		
w: Contenido de agua	G: Grav as	SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos
w <sub>L</sub> : Límite líquido	S: Arenas	NC: No se pudo clasificar de acuerdo al SUCS
w <sub>P</sub> : Límite plástico	F: Finos	P.S. Parte superior
PI: Índice plástico	G <sub>s</sub> : Densidad de sólidos	P.I. Parte inferior

Tabla 6.2.2 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mixto 02.  
Flopac, 2015e.

Sondeo	Muestra	Profundidad		Propiedades índice								SUCS	
		de m	a m	w %	G %	S %	F %	W <sub>L</sub> %	W <sub>P</sub> %	PI %	G <sub>s</sub>		
SM-02	3	1.20	1.80	7.18	0.00	58.37	41.63	-	-	-	2.97	NC	
SM-02	5	2.40	3.00	12.31	0.00	54.43	45.57	-	-	-	3.01	NC	
SM-02	6	3.00	3.60	11.51	0.00	70.25	29.75	-	-	-	3.21	NC	
SM-02	17	9.60	10.20	18.90	0.00	31.70	68.30	-	-	-	3.10	NC	
SM-02	19	11.00	11.60	14.39	0.00	35.15	64.85	-	-	-	3.00	NC	
SM-02	30	18.20	18.80	20.40	0.00	15.30	84.70	-	-	-	2.94	NC	
SM-02	37	22.60	23.20	19.50	0.00	11.30	88.70	-	-	-	2.91	NC	
SM-02	46	28.60	29.20	19.78	0.00	48.10	51.90	-	-	-	3.09	NC	
SM-02	52	32.50	33.10	12.69	0.00	57.35	42.65	-	-	-	3.16	NC	
SM-02	57	35.50	36.10	16.89	0.00	65.40	34.60	-	-	-	3.07	NC	
SM-02	61	37.90	38.50	17.42	0.00	6.65	93.35	-	-	-	3.11	NC	
SM-02	64	39.70	40.30	20.28	0.00	10.80	89.20	-	-	-	3.10	NC	
SM-02	69	43.00	43.60	23.60	0.00	0.80	99.20	-	-	-	2.91	NC	
SM-02	73	46.00	46.60	19.46	0.00	47.65	52.35	-	-	-	3.04	NC	
SM-02	76	47.80	48.40	15.06	0.00	48.75	51.25	-	-	-	3.20	NC	
SM-02	80	50.20	50.80	19.43	0.00	54.15	45.85	-	-	-	3.37	NC	
SM-02	81	50.80	51.40	11.51	0.00	54.85	45.15	-	-	-	3.32	NC	
SM-02	84	52.60	53.20	11.83	0.00	56.30	43.70	-	-	-	3.17	NC	

**Simbología**

w: Contenido de agua	G: Gravias	SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos
w <sub>L</sub> : Límite líquido	S: Arenas	NC: No se pudo clasificar de acuerdo al SUCS
w <sub>P</sub> : Límite plástico	F: Finos	P.S. Parte superior
PI: Índice plástico	G <sub>s</sub> : Densidad de sólidos	P.I. Parte inferior

Tabla 6.2.3 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mixto 03.  
Flopac, 2015e.

Sondeo	Muestra	Profundidad		Propiedades índice								SUCS	
		de m	a m	w %	G %	S %	F %	W <sub>L</sub> %	W <sub>P</sub> %	PI %	G <sub>s</sub>		
SM-03	4	1.80	2.40	16.53	0.00	36.65	63.35	-	-	-	3.10	NC	
SM-03	11	6.00	6.60	12.45	0.00	41.65	58.35	-	-	-	2.97	NC	
SM-03	19	10.80	11.40	19.79	0.00	26.75	73.25	-	-	-	2.97	NC	
SM-03	21	12.60	13.20	25.46	0.00	15.07	84.93	-	-	-	3.03	NC	
SM-03	25a	15.00	15.60	14.24	0.00	25.92	74.08	-	-	-	3.01	NC	
SM-03	25b	15.00	15.60	14.24	0.00	1.50	98.50	-	-	-	3.01	NC	
SM-03	30	18.00	18.60	22.93	0.00	15.70	84.30	-	-	-	2.90	NC	
SM-03	36	21.60	22.20	9.71	0.00	12.75	87.25	-	-	-	2.94	NC	
SM-03	37	22.80	23.40	23.01	0.00	1.90	98.10	-	-	-	2.94	NC	
SM-03	40	24.60	25.20	23.64	0.00	2.40	97.60	18.44	12.56	5.88	2.89	CL-ML	Arcilla limosa
SM-03	46	28.20	28.80	27.09	0.00	4.25	95.75	20.85	13.93	6.92	2.98	CL-ML	Arcilla limosa
SM-03	52	32.40	33.00	25.01	0.00	0.50	99.50	24.30	12.66	11.65	3.00	CL	Arcilla de baja plasticidad
SM-03	56	34.80	35.40	24.01	0.00	0.05	99.95	23.74	12.52	11.22	2.96	CL	Arcilla de baja plasticidad
SM-03	59	37.20	37.80	31.85	26.04	43.32	30.64	26.99	14.68	12.31	2.97	SC	Arena arcillosa con grava
SM-03	62	39.00	39.60	8.69	32.32	47.24	20.44	-	-	-	2.97	NC	
SM-03	67	42.00	42.60	9.69	0.00	14.00	86.00	-	-	-	2.83	NC	

**Simbología**

w: Contenido de agua	G: Gravias	SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos
w <sub>L</sub> : Límite líquido	S: Arenas	NC: No se pudo clasificar de acuerdo al SUCS
w <sub>P</sub> : Límite plástico	F: Finos	P.S. Parte superior
PI: Índice plástico	G <sub>s</sub> : Densidad de sólidos	P.I. Parte inferior

Tabla 6.2.4 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mirxto 04.  
Flopac, 2015e.

Sondeo	Muestra	Profundidad		Propiedades índice								SUCS		
		de m	a m	w %	G %	S %	F %	w <sub>L</sub> %	w <sub>P</sub> %	PI %	G <sub>s</sub>			
SM-04	5	2.40	3.00	18.93	0.00	24.36	75.64	-	-	-	-	3.12	NC	
SM-04	9	4.80	5.40	17.43	0.00	31.65	68.35	-	-	-	-	3.06	NC	
SM-04	15	8.40	9.00	14.10	0.00	40.95	59.05	-	-	-	-	3.07	NC	
SM-04	24	14.00	14.60	18.16	0.00	12.55	87.45	-	-	-	-	3.00	NC	
SM-04	29	17.00	17.60	13.52	0.00	29.75	70.25	-	-	-	-	2.96	NC	
SM-04	37	22.60	23.20	19.71	0.00	12.95	87.05	-	-	-	-	2.91	NC	
SM-04	40	24.40	25.00	14.25	0.00	29.00	71.00	-	-	-	-	2.84	NC	
SM-04	44	26.80	27.40	18.27	0.00	16.86	83.14	-	-	-	-	2.95	NC	
SM-04	47	28.60	29.20	14.32	0.00	19.45	80.55	-	-	-	-	3.03	NC	
SM-04	51	31.00	31.60	20.27	0.00	25.10	74.90	-	-	-	-	3.01	NC	
SM-04	57	34.60	35.20	18.28	0.00	2.86	97.14	-	-	-	-	2.98	NC	
SM-04	64	39.40	40.00	20.91	0.00	0.25	99.75	22.99	13.27	9.72	3.03	CL	Arcilla de baja plasticidad	
SM-04	66	41.20	41.80	20.36	0.00	0.15	99.85	23.56	16.24	7.32	2.97	CL	Arcilla de baja plasticidad	
SM-04	70	43.60	44.20	21.44	0.00	0.75	99.25	19.61	14.54	5.07	2.96	CL-ML	Arcilla limosa	
SM-04	77 P.S.	47.80	48.22	3.32	0.00	66.05	33.95	-	-	-	-	2.94	NC	
SM-04	77 P.I.	47.80	48.22	3.32	0.00	0.60	99.40	-	-	-	-	2.94	NC	

**Simbología**

w: Contenido de agua	G: Gravias	SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos
w <sub>L</sub> : Límite líquido	S: Arenas	NC: No se pudo clasificar de acuerdo al SUCS
w <sub>P</sub> : Límite plástico	F: Finos	P.S. Parte superior
PI: Índice plástico	G <sub>s</sub> : Densidad de sólidos	P.I. Parte inferior

Tabla 6.2.5 Resultados de las propiedades índice correspondientes al sondeo mirxto 05.  
Flopac, 2015e.

Sondeo	Muestra	Profundidad		Propiedades índice								SUCS		
		de m	a m	w %	G %	S %	F %	w <sub>L</sub> %	w <sub>P</sub> %	PI %	G <sub>s</sub>			
SM-05	3	1.20	1.80	7.26	0.00	64.20	35.80	-	-	-	-	2.83	NC	
SM-05	5	2.40	3.00	14.69	0.00	80.80	19.20	-	-	-	-	3.30	NC	
SM-05	8	4.20	4.80	12.07	0.00	45.25	54.75	-	-	-	-	3.07	NC	
SM-05	12	9.00	9.60	10.00	0.00	74.05	25.95	-	-	-	-	3.08	NC	
SM-05	14	10.20	10.80	15.17	0.00	46.74	53.26	-	-	-	-	3.07	NC	
SM-05	16	11.40	12.00	16.56	0.00	15.85	84.15	-	-	-	-	3.00	NC	
SM-05	22	15.00	15.60	13.54	0.00	55.40	44.60	-	-	-	-	3.00	NC	
SM-05	27	18.00	18.60	12.78	0.00	53.05	46.95	-	-	-	-	2.92	NC	
SM-05	32	21.00	21.60	20.11	0.00	16.50	83.50	-	-	-	-	2.94	NC	
SM-05	44	28.20	28.80	12.05	0.00	71.30	28.70	-	-	-	-	3.12	NC	
SM-05	53	33.80	34.40	15.54	0.00	24.60	75.40	-	-	-	-	2.97	NC	
SM-05	63	39.80	40.40	13.45	0.00	69.60	30.40	-	-	-	-	2.97	NC	
SM-05	73	45.80	46.40	16.68	0.00	14.25	85.75	-	-	-	-	2.99	NC	
SM-05	77	48.20	48.80	20.09	0.00	11.90	88.10	-	-	-	-	3.03	NC	

**Simbología**

w: Contenido de agua	G: Gravias	SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos
w <sub>L</sub> : Límite líquido	S: Arenas	NC: No se pudo clasificar de acuerdo al SUCS
w <sub>P</sub> : Límite plástico	F: Finos	P.S. Parte superior
PI: Índice plástico	G <sub>s</sub> : Densidad de sólidos	P.I. Parte inferior



Tabla 6.2.6 Resultados de las propiedades indice correspondientes al sondeo mirxto 06. Flopac, 2015e.

Sondeo	Muestra	Profundidad		Propiedades indice								G <sub>s</sub>	SUCS	
		de m	a m	w %	G %	S %	F %	w <sub>L</sub> %	w <sub>p</sub> %	PI %				
SM-06	3	1.20	1.80	14.05	0.00	57.55	42.45	-	-	-	-	3.08	NC	
SM-06	7	3.60	4.20	12.13	0.00	53.10	46.90	-	-	-	-	3.20	NC	
SM-06	11	6.00	6.60	17.35	0.00	32.50	67.50	-	-	-	-	3.06	NC	
SM-06	13	7.20	7.80	16.03	0.00	38.70	61.30	-	-	-	-	3.04	NC	
SM-06	17	9.60	10.20	17.42	0.00	37.40	62.60	-	-	-	-	3.07	NC	
SM-06	20	11.20	11.80	16.84	0.00	40.35	59.65	-	-	-	-	3.03	NC	
SM-06	22	12.40	13.00	12.48	0.00	60.80	39.20	-	-	-	-	3.08	NC	
SM-06	24	13.60	14.20	12.35	0.00	12.20	87.80	-	-	-	-	2.93	NC	
SM-06	30	17.20	17.80	13.21	0.00	54.80	45.20	-	-	-	-	2.98	NC	
SM-06	31	17.80	18.40	14.25	0.00	60.75	39.25	-	-	-	-	2.93	NC	
SM-06	38	21.80	22.40	14.42	0.00	62.65	37.35	-	-	-	-	3.02	NC	
SM-06	44	25.40	26.00	12.13	0.00	64.45	35.55	-	-	-	-	3.01	NC	
SM-06	50	29.00	29.60	13.20	0.00	48.25	51.75	-	-	-	-	3.03	NC	
SM-06	53 P.S.	31.10	31.66	22.69	0.00	45.60	54.40	-	-	-	-	3.04	NC	
SM-06	53 P.I.	31.10	31.66	20.56	0.00	20.40	79.60	-	-	-	-	2.66	NC	

**Simbología**  
w: Contenido de agua                      G: Gravias                                      SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos  
w<sub>L</sub>: Límite líquido                        S: Arenas    NC: No se pudo clasificar de acuerdo al SUCS  
w<sub>p</sub>: Límite plástico                       F: Finos    P.S. Parte superior  
PI: Índice plástico                         G<sub>s</sub>: Densidad de sólidos                      P.I. Parte inferior

Debido a la baja plasticidad de la mayoría de las muestras, no se pudieron obtener límites de consistencia y no se pudieron clasificar de acuerdo al SUCS, sin embargo de ello se deduce que los materiales del vaso de almacenamiento son en su mayoría limos, en los sondeos realizados sobre la cortina predominan las arenas.

Tabla 6.2.7 Resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras recuperadas de los tubos Shelby. Flopac, 2015e.

Sondeo	Muestra	Profundidad		Propiedades indice de las muestras recuperadas de los tubos Shelby										SUCS	
		de m	a m	w %	G %	S %	F %	w <sub>L</sub> %	w <sub>p</sub> %	PI %	G <sub>s</sub>	γ g/cm <sup>3</sup>			
SM-01	1	10.00	10.60	22.88	0.00	3.90	96.10	-	-	-	-	3.01	2.15	-	Debido a la baja plasticidad del material no se pudo clasificar
SM-01	2	20.00	20.40	18.11	0.20	18.85	80.95	-	-	-	-	2.99	2.18	-	Debido a la baja plasticidad del material no se pudo clasificar
SM-02	18	10.20	11.00	20.46	0.00	58.00	42.00	-	-	-	-	3.10	2.06	-	Debido a la baja plasticidad del material no se pudo clasificar
SM-02	33	20.00	20.80	22.55	0.00	48.15	51.85	21.04	11.02	10.02	-	2.92	2.05	CL	Arcilla arenosa de baja plasticidad
SM-03	1	10.80	11.60	27.43	0.00	35.75	64.25	-	-	-	-	3.09	2.10	-	Debido a la baja plasticidad del material no se pudo clasificar
SM-03	2	19.80	20.60	19.73	0.00	6.75	93.25	22.38	18.82	3.56	-	2.92	2.17	ML	Limo arenoso
SM-03	3	29.40	30.20	24.81	0.00	9.60	90.40	28.26	18.26	10.00	-	2.88	2.04	CL	Arcilla arenosa de baja plasticidad
SM-04	18	10.20	11.00	14.27	0.00	68.20	31.80	19.57	14.97	4.60	-	3.05	2.02	SC-SM	Arena limo arcillosa
SM-05	11	6.00	6.80	10.76	0.00	64.00	36.00	21.29	15.71	5.58	-	3.11	2.22	SC-SM	Arena limo arcillosa
SM-05	1	10.00	10.80	14.93	0.00	66.10	33.90	-	-	-	-	3.07	1.94	-	Debido a la baja plasticidad del material no se pudo clasificar
SM-05	2	20.00	20.20	11.69	0.00	49.35	50.65	18.06	12.59	5.47	-	3.04	2.20	CL-ML	Arcilla limo arenosa
SM-05	3	30.00	30.30	15.02	0.40	70.60	29.00	17.92	14.26	3.66	-	3.11	2.14	SM	Arena limosa
SM-05	4	40.00	40.30	20.72	0.00	36.45	63.55	20.02	14.67	5.35	-	2.95	2.20	CL-ML	Arcilla limo arenosa
SM-05	5	50.00	50.40	18.97	0.00	3.20	96.80	20.63	13.81	6.82	-	2.97	2.15	CL-ML	Arcilla limo arenosa
SM-06	18	10.20	10.60	19.13	0.00	4.10	95.90	20.46	13.08	7.38	-	2.92	2.14	CL	Arcilla arenosa de baja plasticidad
SM-06	35	20.20	20.60	23.40	0.00	25.95	74.05	21.42	15.34	6.08	-	2.87	2.12	CL-ML	Arcilla limo arenosa

**Simbología**  
w: Contenido de agua                      G: Gravias                                      SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos  
w<sub>L</sub>: Límite líquido                        S: Arenas    NC: No se pudo clasificar de acuerdo al SUCS  
w<sub>p</sub>: Límite plástico                       F: Finos    P.S. Parte superior  
PI: Índice plástico                         G<sub>s</sub>: Densidad de sólidos                      P.I. Parte inferior

**Tabla 6.2.8 Resultados de las pruebas triaxiales tipo UU realizadas a las muestras recuperadas de los tubos Shelby. Flopac, 2015e.**

Muestra	Peso de pñon kg	DATOS DE LA PROBETA					RELACIONES VOLUMÉTRICAS													
		D <sub>m</sub> cm	H <sub>m</sub> cm	W <sub>m</sub> g	w %	A cm <sup>2</sup>	G <sub>s</sub>	V <sub>m</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>w</sub> g	W <sub>s</sub> g	V <sub>s</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>v</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>w</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>a</sub> cm <sup>3</sup>	e	C	G <sub>w</sub> %	γ <sub>m</sub> g/cm <sup>3</sup>	φ	c
		$A_m = \pi r^2$					$V = AH_m$	$W_w = W_m w$	$W_s = W_m(1-w)$	$V_s = W_s/(G_s \gamma_s)$	$V_v = V - V_s$	$V_w = W_w/\gamma_w$	$V_a = V - V_w$	$e = W_v/V_s$	$C = e/(1+e)$	$G_w = V_w/V_s$	$\gamma_m = W_m/V_m$	-	-	-
SM1-M1-100-UU		3.720	9.060	212.400	18.000	10.869	3.010	98.470	32.400	180.000	59.801	38.669	32.400	6.269	0.647	0.393	83.787	2.157	29	0.85
SM1-M1-150-UU		3.620	9.000	206.600	18.000	10.292		92.630	31.515	175.085	58.168	34.462	31.515	2.947	0.592	0.372	91.450	2.230	29	0.85
SM1-M1-200-UU		3.580	8.360	178.300	18.000	10.066		84.152	27.198	151.102	50.200	33.952	27.198	6.753	0.676	0.403	80.109	2.119	29	0.85
SM1-M2-100-UU		3.590	9.030	204.100	16.700	10.122		91.404	29.207	174.893	58.104	33.300	29.207	4.093	0.573	0.364	87.708	2.233	44	0.00
SM1-M2-150-UU		3.610	8.350	194.300	18.100	10.235	2.990	85.465	29.778	164.522	54.658	30.807	29.778	1.029	0.564	0.360	96.661	2.273	44	0.00
SM1-M2-200-UU		3.600	8.770	201.900	17.700	10.179		89.268	30.362	171.538	56.989	32.278	30.362	1.916	0.566	0.362	94.063	2.262	44	0.00
SM2-M18-100-UU		3.580	9.000	207.800	18.700	10.066	3.100	90.594	32.737	175.063	58.161	32.433	32.737	-0.304	0.558	0.358	100.936	2.294	23	0.59
SM2-M18-150-UU		3.590	9.000	206.600	18.100	10.122		91.101	31.664	174.936	58.118	32.982	31.664	1.319	0.567	0.362	96.002	2.268	23	0.59
SM2-M18-200-UU																				
SM2-M33-100-UU		3.500	9.020	188.400	16.800	9.621	2.920	86.783	27.099	161.301	53.588	33.194	27.099	6.095	0.619	0.382	81.637	2.171	33	0.00
SM2-M33-150-UU		3.380	8.890	185.400	16.200	8.973		79.767	25.848	159.552	53.007	26.740	25.848	0.912	0.505	0.335	96.591	2.324	33	0.00
SM2-M33-200-UU		3.440	9.000	212.000	11.700	10.406		93.656	22.206	189.794	63.055	30.601	22.206	8.395	0.485	0.327	72.565	2.264	33	0.00
SM3-M1-100-UU		3.570	9.010	203.000	20.000	10.010	3.090	90.188	33.833	149.167	56.202	33.987	33.833	0.154	0.605	0.377	99.548	2.251	29	0.00
SM3-M1-150-UU		3.480	9.040	181.200	17.000	9.511		85.984	26.328	154.872	51.452	34.531	26.328	8.203	0.671	0.402	76.244	2.107	29	0.00
SM3-M1-200-UU		3.470	9.000	192.700	16.000	9.457		85.112	26.579	166.121	55.190	29.923	26.579	3.343	0.542	0.352	88.827	2.264	29	0.00
SM3-M2-100-UU		3.630	8.930	196.500	21.000	10.349	2.920	92.418	34.103	162.397	53.952	38.465	34.103	4.362	0.713	0.416	86.660	2.126	39	0.00
SM3-M2-150-UU		3.530	9.600	192.200	20.000	9.787		93.953	32.033	160.167	53.212	40.741	32.033	8.708	0.766	0.434	78.626	2.046	39	0.00
SM3-M2-200-UU		3.600	8.650	197.200	21.000	10.179		88.046	34.225	162.975	54.145	33.902	34.225	-0.323	0.626	0.385	100.953	2.240	39	0.00
SM3-M3-100-UU		3.540	8.880	198.400	19.000	9.842	2.880	87.400	31.677	166.723	55.390	32.010	31.677	0.333	0.578	0.366	98.961	2.270	**	**
SM3-M3-150-UU		3.560	8.940	193.500	24.000	9.954		88.987	37.452	156.048	51.843	37.144	37.452	-0.308	0.716	0.417	100.829	2.174	-	-
SM3-M3-200-UU		3.590	8.910	194.900	24.000	10.122		90.190	37.723	157.177	52.218	37.971	37.723	0.249	0.727	0.421	99.345	2.161	-	-
SM4-M18-100-UU	3	3.600	9.000	182.600	14.000	10.179	3.050	91.609	22.425	160.175	53.214	38.394	22.425	15.970	0.722	0.419	58.406	1.993	34	0.08
SM4-M18-150-UU	3	3.600	9.000	183.200	14.000	10.179		91.609	22.498	160.702	53.389	38.220	22.498	15.721	0.716	0.417	58.866	2.000	34	0.08
SM4-M18-200-UU	3	3.600	9.000	185.500	14.000	10.179		91.609	22.781	162.719	54.060	37.549	22.781	14.769	0.695	0.410	60.669	2.025	34	0.08

**DONDE:** D Diámetro de la muestra G<sub>s</sub> Densidad relativa de sólidos V<sub>s</sub> Volumen de la fase sólida e Relación de vacíos φ Ángulo de fricción  
H Altura de la muestra V<sub>m</sub> Volumen de la muestra V<sub>v</sub> Volumen de vacíos C Concentración de sólidos c Cohesión  
W<sub>m</sub> Peso de la muestra W<sub>w</sub> Peso del agua V<sub>w</sub> Volumen del agua G<sub>w</sub> Grado de saturación de agua γ<sub>m</sub> Peso específico de la muestra  
A Área de la muestra W<sub>s</sub> Peso de la fase sólida V<sub>a</sub> Volumen del aire γ<sub>m</sub> Peso específico de la muestra

**Tabla 6.2.9 Resultados de las pruebas triaxiales tipo UU realizadas a las muestras recuperadas de los tubos Shelby. Flopac, 2015e.**

Muestra	Peso de pñon kg	DATOS DE LA PROBETA					RELACIONES VOLUMÉTRICAS													
		D <sub>m</sub> cm	H <sub>m</sub> cm	W <sub>m</sub> g	w %	A cm <sup>2</sup>	G <sub>s</sub>	V <sub>m</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>w</sub> g	W <sub>s</sub> g	V <sub>s</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>v</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>w</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>a</sub> cm <sup>3</sup>	e	C	G <sub>w</sub> %	γ <sub>m</sub> g/cm <sup>3</sup>	φ	c
		$A_m = \pi r^2$					$V = AH_m$	$W_w = W_m w$	$W_s = W_m(1-w)$	$V_s = W_s/(G_s \gamma_s)$	$V_v = V - V_s$	$V_w = W_w/\gamma_w$	$V_a = V - V_w$	$e = W_v/V_s$	$C = e/(1+e)$	$G_w = V_w/V_s$	$\gamma_m = W_m/V_m$	-	-	-
SM5-M1-100-UU		3.630	9.030	170.300	10.500	10.349	3.070	93.452	16.182	154.118	50.201	43.251	16.182	27.069	0.862	0.463	37.415	1.822	34	0.60
SM5-M1-150-UU		3.640	9.200	195.100	11.000	10.406		95.737	19.334	175.766	57.253	38.484	19.334	19.150	0.672	0.402	50.239	2.038	34	0.60
SM5-M1-200-UU		3.590	9.030	190.400	21.000	10.122		91.404	33.045	157.355	51.256	40.148	33.045	7.104	0.783	0.439	82.306	2.083	34	0.60
SM5-M2-100-UU	2	3.600	9.000	197.700	12.000	10.179	3.040	91.609	21.182	176.518	58.065	33.544	21.182	12.362	0.578	0.366	63.148	2.158	46	0.00
SM5-M2-150-UU	2	3.600	9.000	195.900	12.000	10.179		91.609	20.989	174.911	57.536	34.072	20.989	13.083	0.592	0.372	61.602	2.138	46	0.00
SM5-M2-200-UU	2	3.600	9.000	197.800	12.000	10.179		91.609	21.193	176.607	58.094	33.514	21.193	12.322	0.577	0.366	63.235	2.159	46	0.00
SM5-M3-100-UU	0.8	3.600	9.000	192.300	15.000	10.179	3.110	91.609	25.083	167.217	53.768	37.841	25.083	12.759	0.704	0.413	66.284	2.099	30	0.15
SM5-M3-150-UU	0.8	3.600	9.000	201.100	15.000	10.179		91.609	26.230	174.870	56.228	35.381	26.230	9.150	0.629	0.386	74.138	2.195	30	0.15
SM5-M3-200-UU	0.8	3.600	9.000	192.500	15.000	10.179		91.609	25.109	167.391	53.824	37.785	25.109	12.677	0.702	0.412	66.451	2.101	30	0.15
SM5-M4-100-UU		3.600	9.000	207.800	14.000	10.179	2.950	91.609	25.519	182.281	61.790	29.819	25.519	4.299	0.483	0.326	85.581	2.268	45	0.00
SM5-M4-150-UU		3.600	9.000	206.600	14.000	10.179		91.609	25.372	181.228	61.433	30.176	25.372	4.804	0.491	0.329	84.081	2.255	45	0.00
SM5-M4-200-UU																				
SM5-M5-100-UU		3.590	8.050	188.300	17.200	10.122	2.970	81.484	27.634	160.666	54.096	27.388	27.634	-0.246	0.506	0.336	100.899	2.311	29	1.20
SM5-M5-150-UU		3.620	7.550	170.100	16.600	10.292		77.706	24.217	145.883	49.119	28.587	24.217	4.370	0.582	0.368	84.712	2.189	29	1.20
SM5-M5-200-UU																				
SM5-M11-100-UU		3.660	8.800	183.700	12.000	10.521	3.110	92.584	19.682	164.018	52.739	39.845	19.682	20.163	0.756	0.430	49.397	1.984	33	0.70
SM5-M11-150-UU		3.610	9.100	198.300	19.000	10.235		93.142	31.661	166.639	53.582	39.560	31.661	7.899	0.738	0.425	80.033	2.129	33	0.70
SM5-M11-200-UU		3.610	9.000	201.000	12.000	10.235		92.118	21.536	179.464	57.706	34.413	21.536	12.877	0.596	0.374	62.580	2.182	33	0.70
SM6-M18-100-UU		3.600	9.000	160.500	7.500	10.179	2.920	91.609	11.198	149.302	51.131	40.478	11.198	29.280	0.792	0.442	27.664	1.752	37	0.15
SM6-M18-150-UU	5	3.600	9.000	162.400	7.500	10.179		91.609	11.330	151.070	51.736	39.673	11.330	28.542	0.771	0.435	28.416	1.773	37	0.15
SM6-M18-200-UU	5	3.600	9.000	161.800	7.500	10.179		91.609	11.288	150.512	51.545	40.064	11.288	28.775	0.777	0.437	28.176	1.766	37	0.15
SM6-M35-100-UU		3.590	8.800	195.700	19.000	10.122	2.870	89.076	31.406	165.294	57.594	31.482	31.406	0.077	0.547	0.353	99.757	2.208	25	

### **Sondeo mixto 1 (SM01).**

De 0.0 - 5.40 m, arcilla arenosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 2 a 23, contenido de agua de 8.74 a 16.93%, porcentajes de grava de 31.20%, arena de 34.15% y finos de 34.65%.

De 5.40 - 16.80 m, arcilla limo arenosa, con número de golpes del ensaye SPT de 6 a 18, contenido de agua de 13.79 a 19.53%, porcentajes de grava de 0.00 a 1.15%, arena de 1.80 a 30% y finos de 70 a 97.50%. Se realizó una prueba de permeabilidad a los 8 m de profundidad obteniendo un coeficiente de permeabilidad (k) de  $3.64E-07$  m/s. De la prueba de ficómetro realizada a la profundidad de 8 m se obtuvieron parámetros de cohesión (c) y fricción ( $\phi$ ) de  $c=0.78$  kg/cm<sup>2</sup> y  $\phi=42.1^\circ$ .

De 16.80 - 30.00 m, arcilla limosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 11 a 34, contenido de agua de 16.25 a 21.81%, porcentajes de grava de 0.00%, arena de 0.85 y 8.50% y finos de 91.15 a 99.15%. Se realizaron pruebas de permeabilidad a los 19 y 29 m de profundidad, obteniendo coeficientes de permeabilidad (k) de  $9.43E-08$  y  $1.15E-07$  m/s, respectivamente. De las pruebas de ficómetro ejecutadas a 17 m y 28 m de profundidad se obtuvieron parámetros de cohesión (c) y fricción ( $\phi$ ) de  $c=1.46$  kg/cm<sup>2</sup>,  $\phi=34.7^\circ$  y  $c=3.36$  kg/cm<sup>2</sup>,  $\phi=35.5^\circ$ , respectivamente.

De 30.00 - 38.40 m, arcilla limosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 20 y mayores a 50, contenido de agua de 24.42 a 15.13%, porcentajes de grava de 0.00%, arena de 1.00 a 2.25% y finos de 97.75 a 99.00%.

De 38.40 - 45.00 m, arcilla limosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 29 y mayores a 50, contenido de agua de 17.16 a 26.92%, porcentajes de grava de 0.00%, arena de 0.50 a 3.20% y finos de 96.80 a 99.50%. Se realizó una prueba de permeabilidad a los 38 m de profundidad, obtenido un coeficiente de permeabilidad (k) de  $4.41E-08$  m/s. De la prueba de ficómetro ejecutada a los 48 m se obtuvieron los siguientes parámetros de cohesión (c) y fricción ( $\phi$ ) de  $c=3.88$  kg/cm<sup>2</sup>,  $\phi=40.4^\circ$ .

De 45.00 - 48.60 m, arcilla limosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 14 a 30, contenido de agua de 12.94 a 25.41%, porcentajes de grava de 0.00%, arena de 0.10 % y finos de 99.90%.

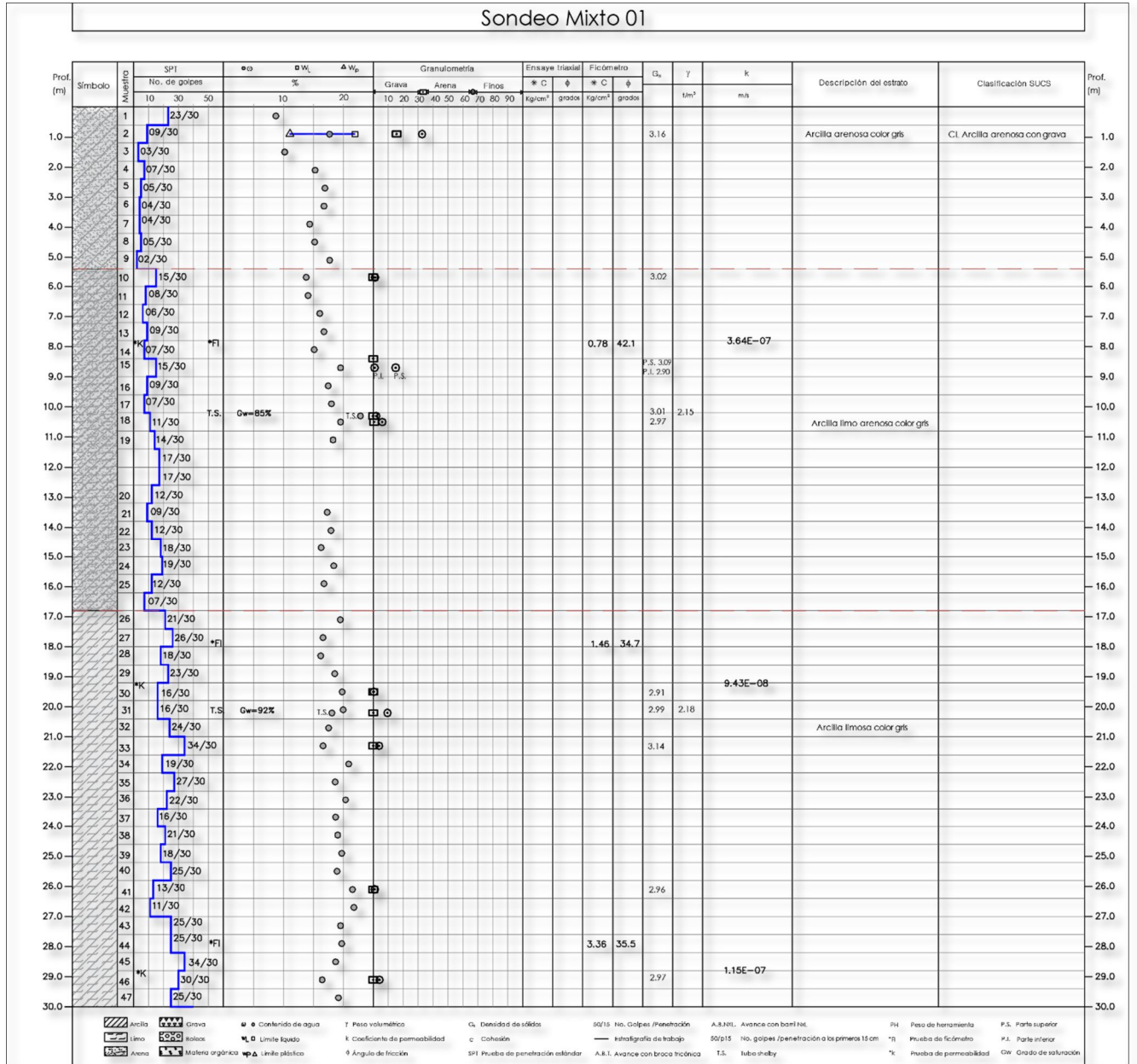


Figura 6.2.1 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 01. Flopac, 2015e.



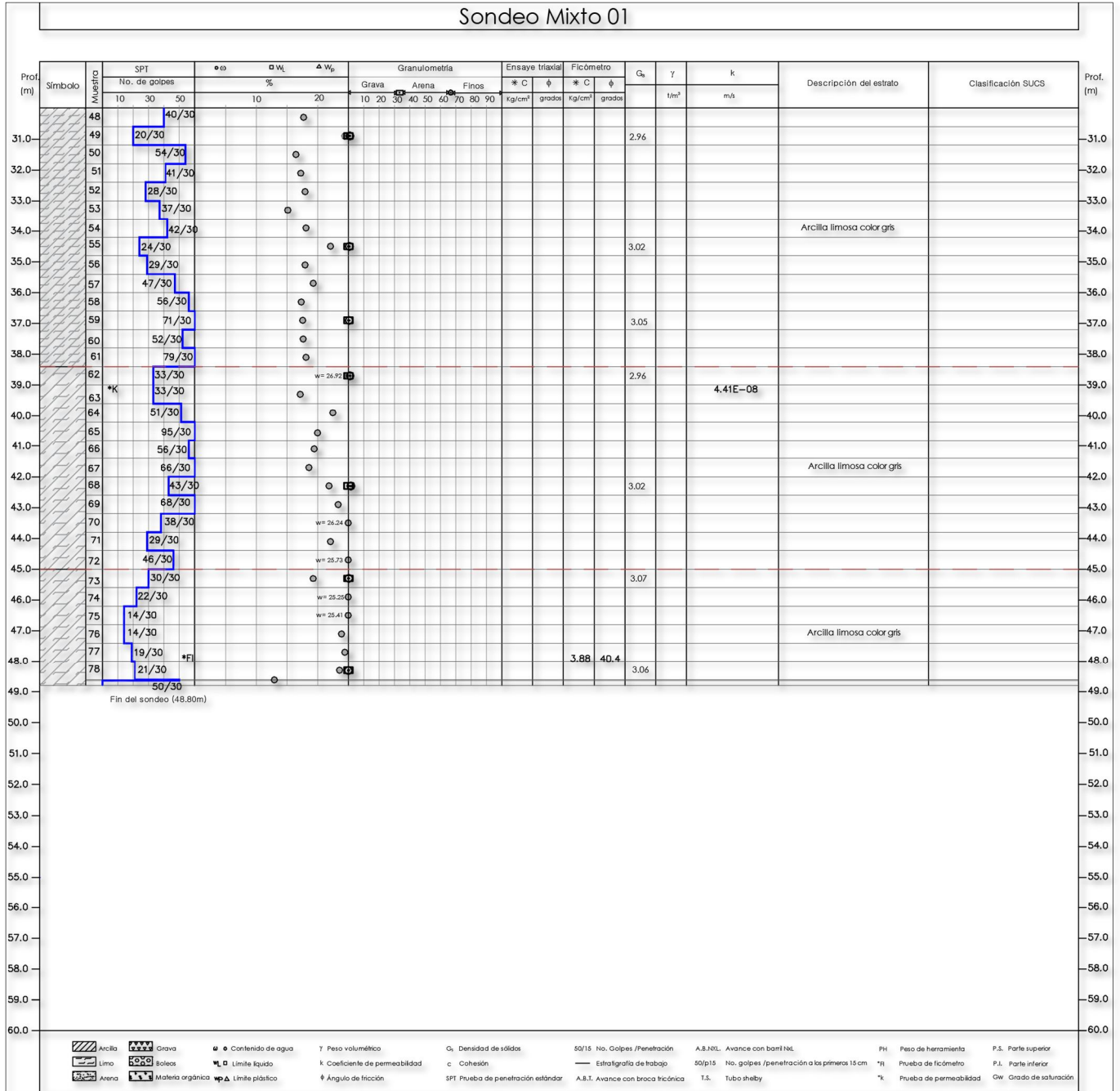


Figura 6.2.2 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 01. Flopac, 2015e.

### **Sondeo mixto 2 (SM02).**

De 0.00 - 11.00 m, arena limo arcillosa, con número de golpes del ensaye SPT de 4 a 17, contenido de agua de 3.83 a 17.82%, porcentajes de grava de 0%, arena de 31.70 a 70.25% y finos de 29.75 a 68.30%.

De 11.00 - 18.80 m, limo arcilloso con arena, con número de golpes del ensaye SPT de 5 a 29, contenido de agua de 8.55 a 20.40%, porcentajes de grava de 0%, arena de 15.30 a 35.15% y finos de 64.85 a 84.70%.

De 18.80 - 23.20 m, arcilla arenosa, con número de golpes del ensaye SPT de 17 a 31, contenido de agua de 11.21% a 22.55%, porcentajes de grava de 0%, arena de 11.30% y finos de 11.30%.

De 23.20 - 47.80 m, arena limo arcillosa, con número de golpes del ensaye SPT de 21 y mayores a los 50, contenido de agua de 11.89 a 28.80%, porcentajes de grava de 0%, arena de 0.80 a 65.40% y finos de 34.6 a 99.20%.

De 47.80 - 53.80 m, arena limo arcillosa, con número de golpes del ensaye SPT superiores a los 50, contenido de agua de 9.83 a 19.43%, porcentajes de grava de 0%, arena de 48.75 a 56.30% y finos de 43.70 a 51.25%.

De 53.80 - 56.50 m, arena limo arcillosa, con número de golpes del ensaye SPT superiores a los 50, contenido de agua de 12.35 a 17.00%.

De 56.50 - 59.80 m, conglomerado color gris, con porcentajes de recuperación (RQD) de 20.30%.

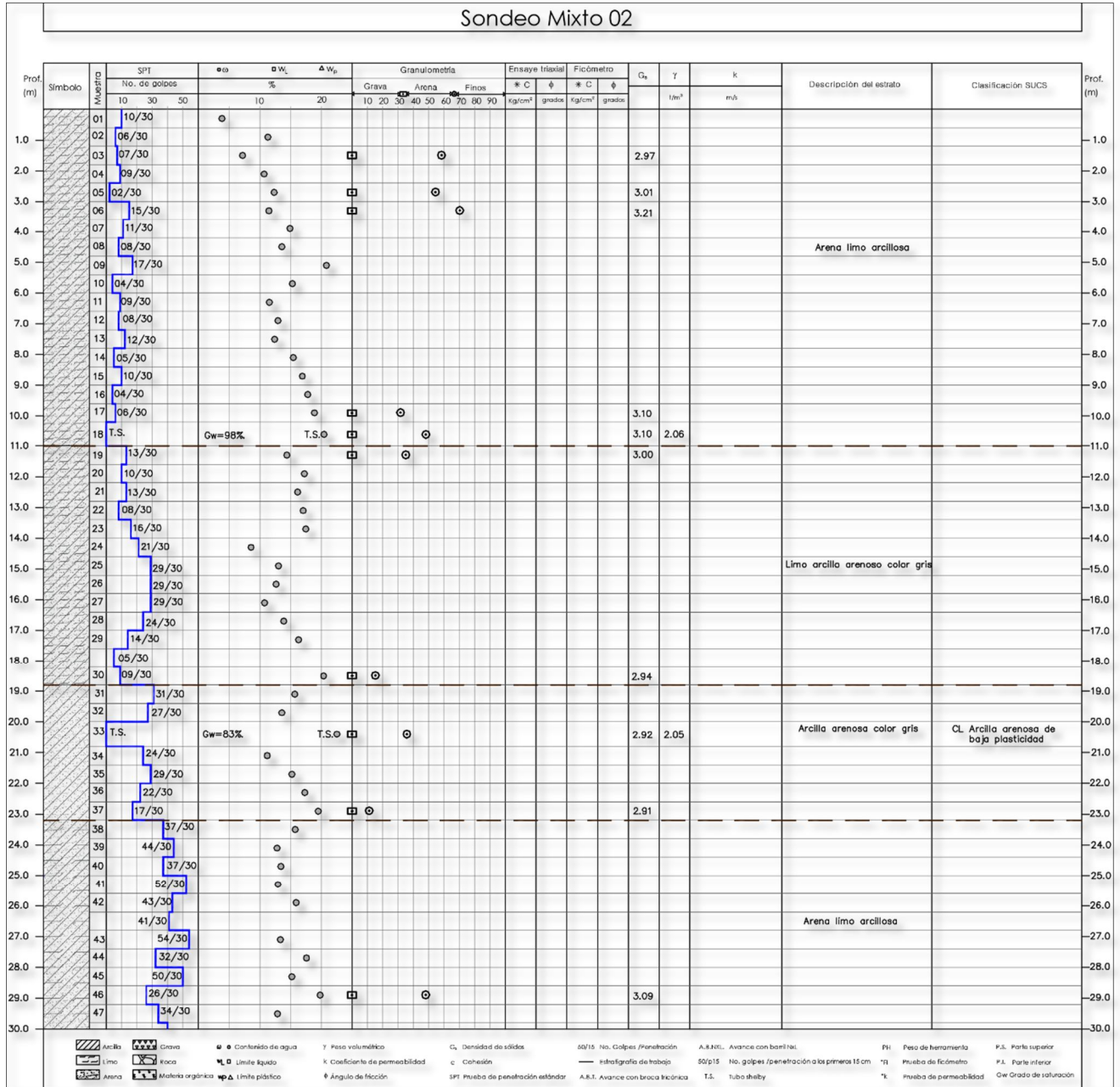


Figura 6.2.3 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 02. Flopac, 2015e.

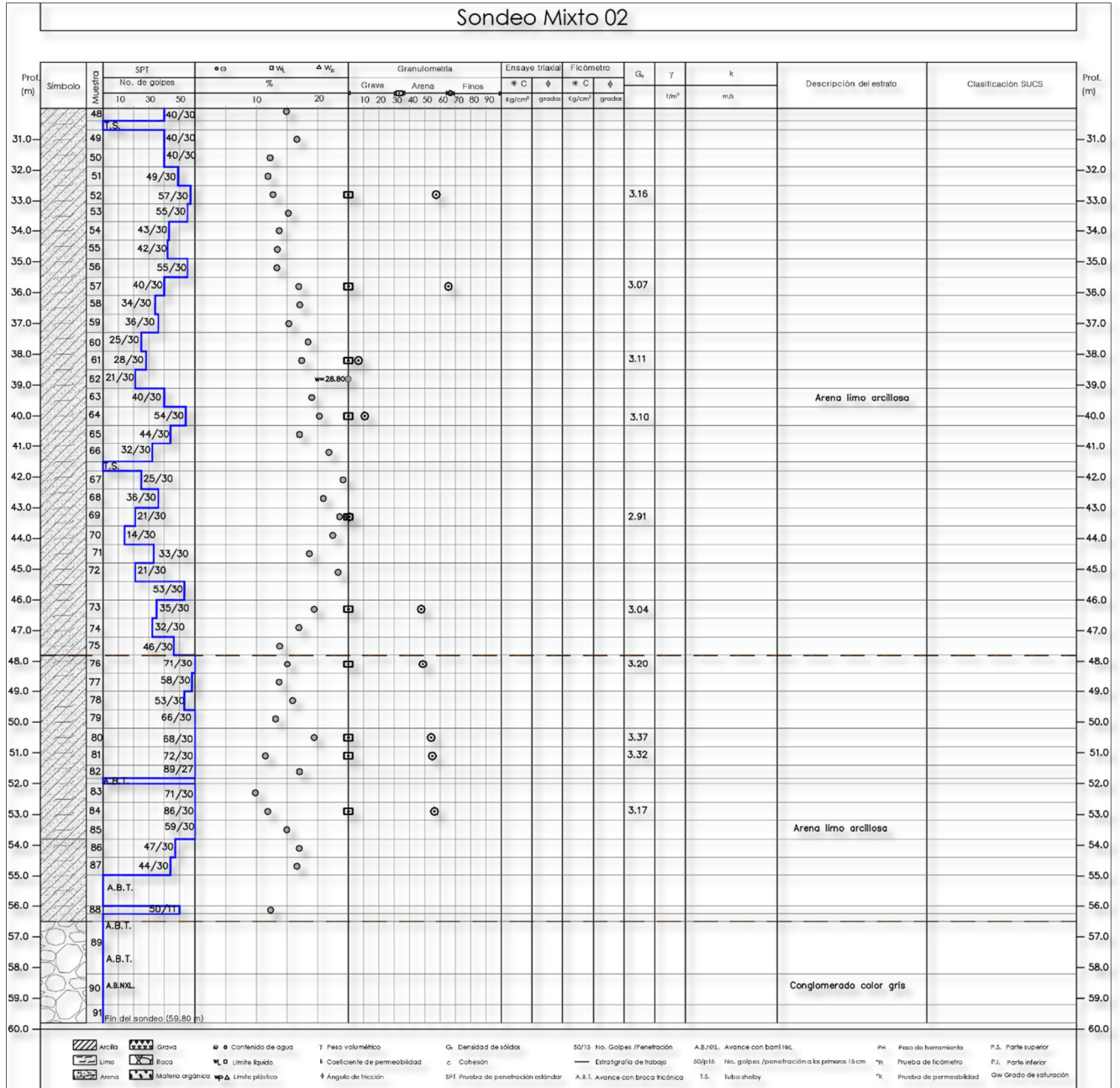


Figura 6.2.4 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 02. Flopac, 2015e.



### **Sondeo mixto 3 (SM03).**

De 0.00 - 20.40 m, limo arenoso color gris claro, con número de golpes del ensaye SPT de 2 a 15, contenido de agua de 12.45 a 25.46%, porcentajes de grava de 0%, arena de 1.50 a 41.65% y finos de 58.35 a 98.50%. Se realizaron pruebas de permeabilidad a 9 y 19 m de profundidad obteniendo coeficientes de permeabilidad (k) de 1.15E-07 y 2.0E-07 m/s, respectivamente. De las pruebas de ficómetro que se efectuaron a 8 y 18 m se obtuvieron parámetros de cohesión (c) y fricción ( $\phi$ ) de  $c=0.5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi=33.2^\circ$  y  $c=0.98 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi=45.3^\circ$ , respectivamente.

De 20.40 - 24.60 m, arcilla limosa color gris claro, con número de golpes del ensaye SPT de 19 a 25, contenido de agua de 9.71 a 23.01%, porcentajes de grava de 0%, arena de 1.90 a 2.40% y finos de 97.60 a 98.10%, valores de límite líquido de 18.44% y límite plástico de 12.56%.

De 24.60 - 30.60 m, arcilla limosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 11 a 30, contenido de agua de 20.28 a 27.36%, porcentajes de grava de 0%, arena de 4.25% y finos de 95.75%, valores de límite líquido de 20.85% y límite plástico de 12.56%.

De 30.60 - 32.40 m, arcilla limo arenosa, con número de golpes del ensaye SPT de 17 a 25, contenido de agua de 20.90 a 24.23%, porcentajes de grava de 0%, arena de 0.50% y finos de 99.50%, valores de límite de líquido de 24.30% y límite plástico de 12.66%.

De 32.40 - 33.60 m, arcilla limo arenosa, con número de golpes del ensaye SPT de 33 a 49, contenido de agua de 25.01 a 25.52%, porcentajes de grava de 0 a 32.32%, arena de 0.05 a 47.24% y finos de 20.44 a 99.95%, valores de límite líquido de 23.74 a 26.99% y límite plástico de 12.52 a 14.68%.

De 33.60 - 39.00 m, arcilla limo arenosa, con número de golpes del ensaye SPT de 06 a 23, contenido de agua de 23.72 a 31.85%, porcentajes de grava de 0%, arena de 14% y finos de 86%.

De 39.00 - 44.40 m, grava con gravilla en arena color rojizo, con número de golpes del ensaye SPT mayores a los 50 golpes, contenido de agua de 6.95 a 10.57%.

De 44.40 - 50.00 m, roca caliza con porcentajes de recuperación (RQD) de 38 a 74%. Se realizaron pruebas de compresión simple en dos de las muestras recuperadas a 45.40 y a 48.50 m; la primera se clasificó como una roca caliza con una resistencia a la compresión de 388.12  $\text{kg/cm}^2$ , mientras que la segunda se clasificó como un conglomerado con una resistencia a la compresión de 343.37  $\text{kg/cm}^2$ .

### Sondeo Mixto 03

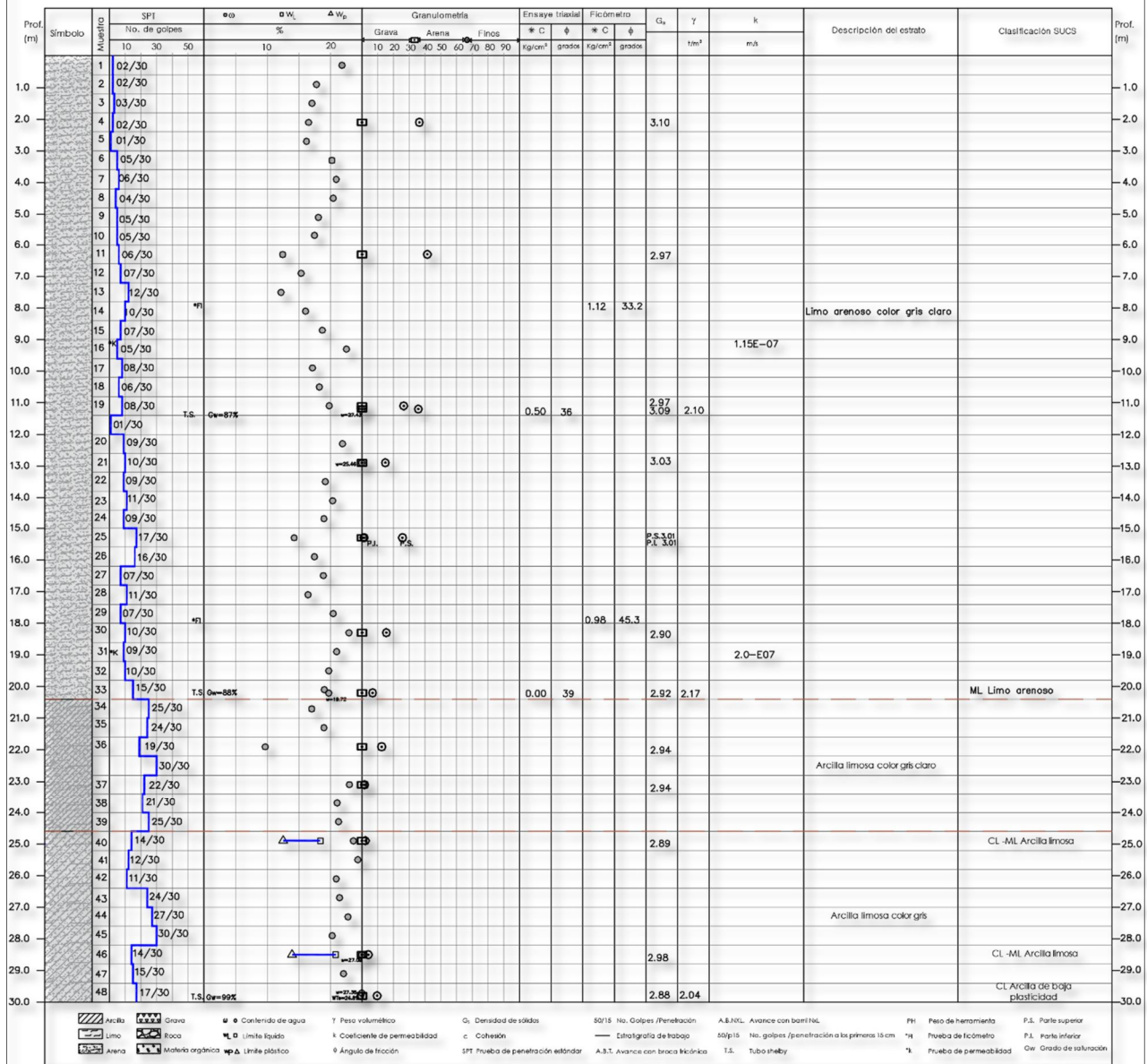


Figura 6.2.5 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 03. Flopac, 2015e.

### Sondeo Mixto 03

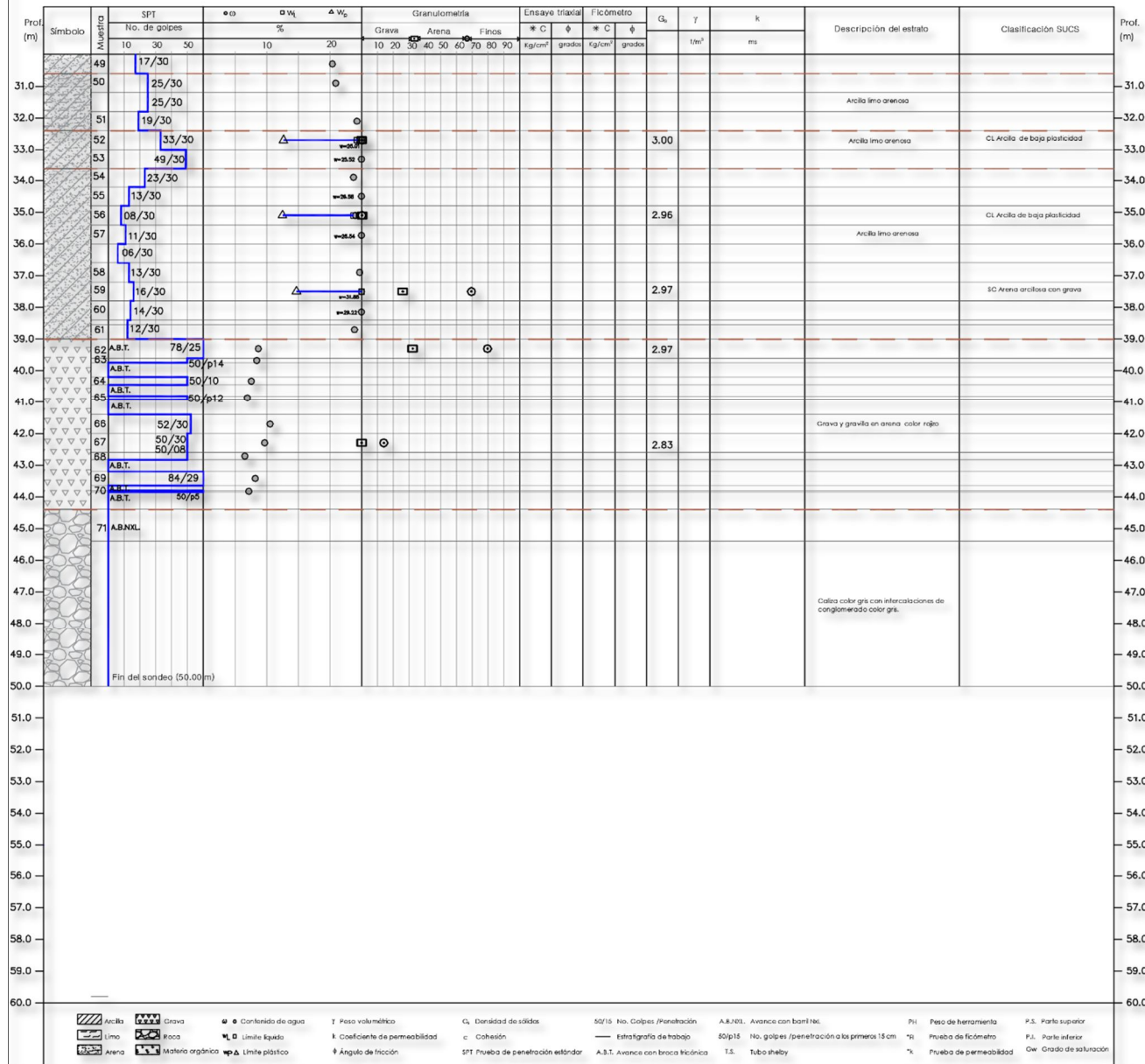


Figura 6.2.6 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 03. Flopac, 2015e.

#### **Sondeo mixto 4 (SM04).**

De 0.00 - 13.40 m, limo arenoso color gris claro, con número de golpes del ensaye SPT de 4 y 11, contenido de agua de 14.10 a 21.98%, porcentajes de grava de 0%, arena de 24.36 a 40.95% y finos de 59.05 a 75.64 %.

De 13.40 - 18.20 m, arcilla limosa color gris claro, con número de golpes del ensaye SPT de 11 a 26, contenido de agua de 13.52 a 21.96%, porcentajes de grava de 0%, arena de 12.55 a 29.75% y finos de 70.25 a 87.45%.

De 18.20 - 25.60 m, arcilla limo arenosa, con número de golpes del ensaye SPT de 11 a 26, contenido de agua de 13.25 a 23.24%, porcentajes de grava de 0%, arena de 12.95 a 29.00% y finos de 71.00 a 87.05%.

De 25.60 - 37.00 m , arcilla limo arenosa, con número de golpes del ensaye SPT de 27 a 35, contenido de agua de 16.21 a 22.06%, porcentajes de grava de 0%, arena de 2.86 a 25.10% y finos de 74.90 a 97.14%.

De 37.00 - 48.51 m, arcilla limo arenosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 8 a 29, contenido de agua de 8.42 a 25.62%, porcentajes de grava de 0%, arena de 0.15 a 0.75% y finos de 97.14 a 99.85%, valores de limite liquido de 19.61 a 23.56% y limite plástico de 13.27 a 16.24%.

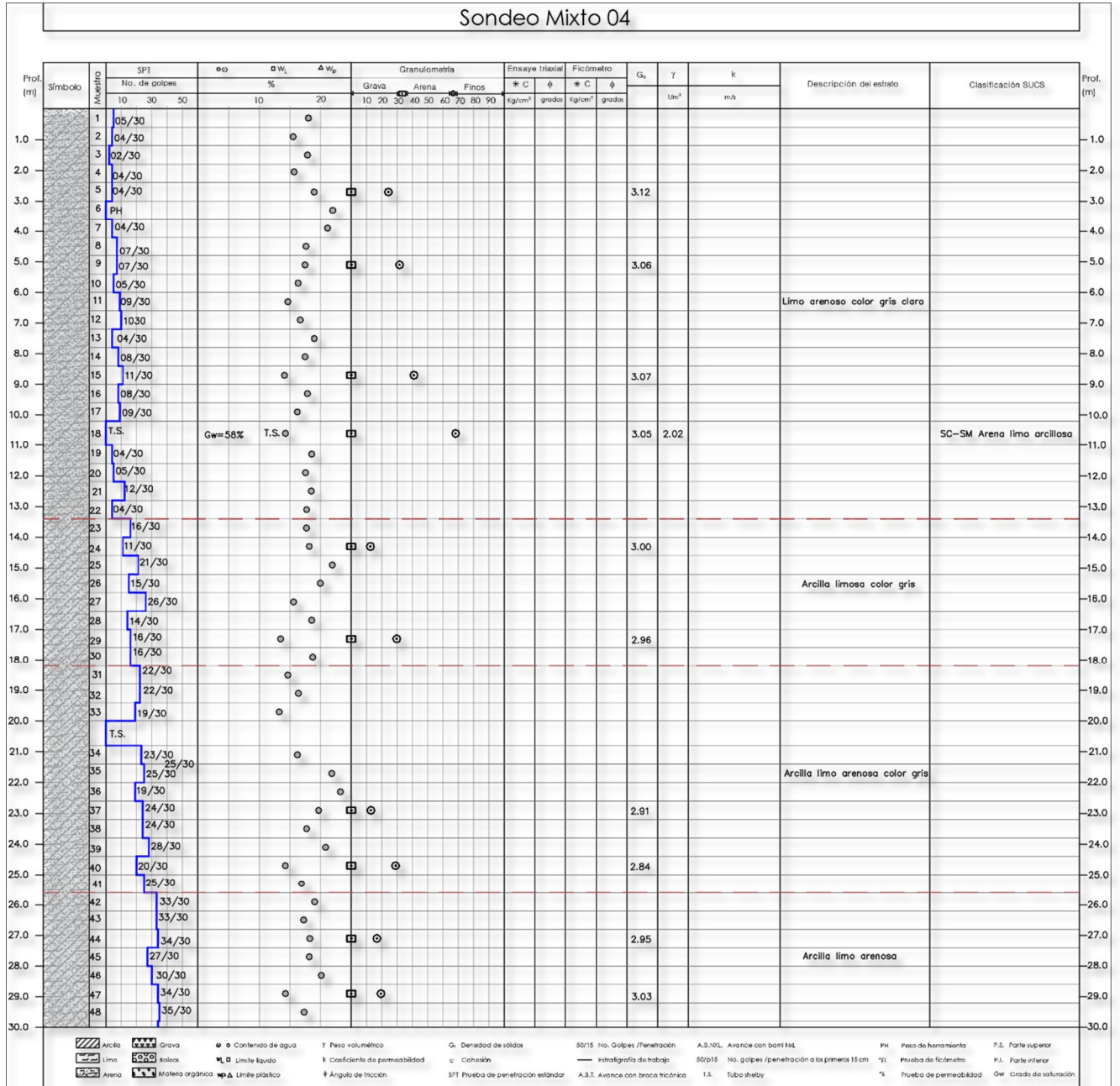


Figura 6.2.7 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 04. Flopac, 2015e.



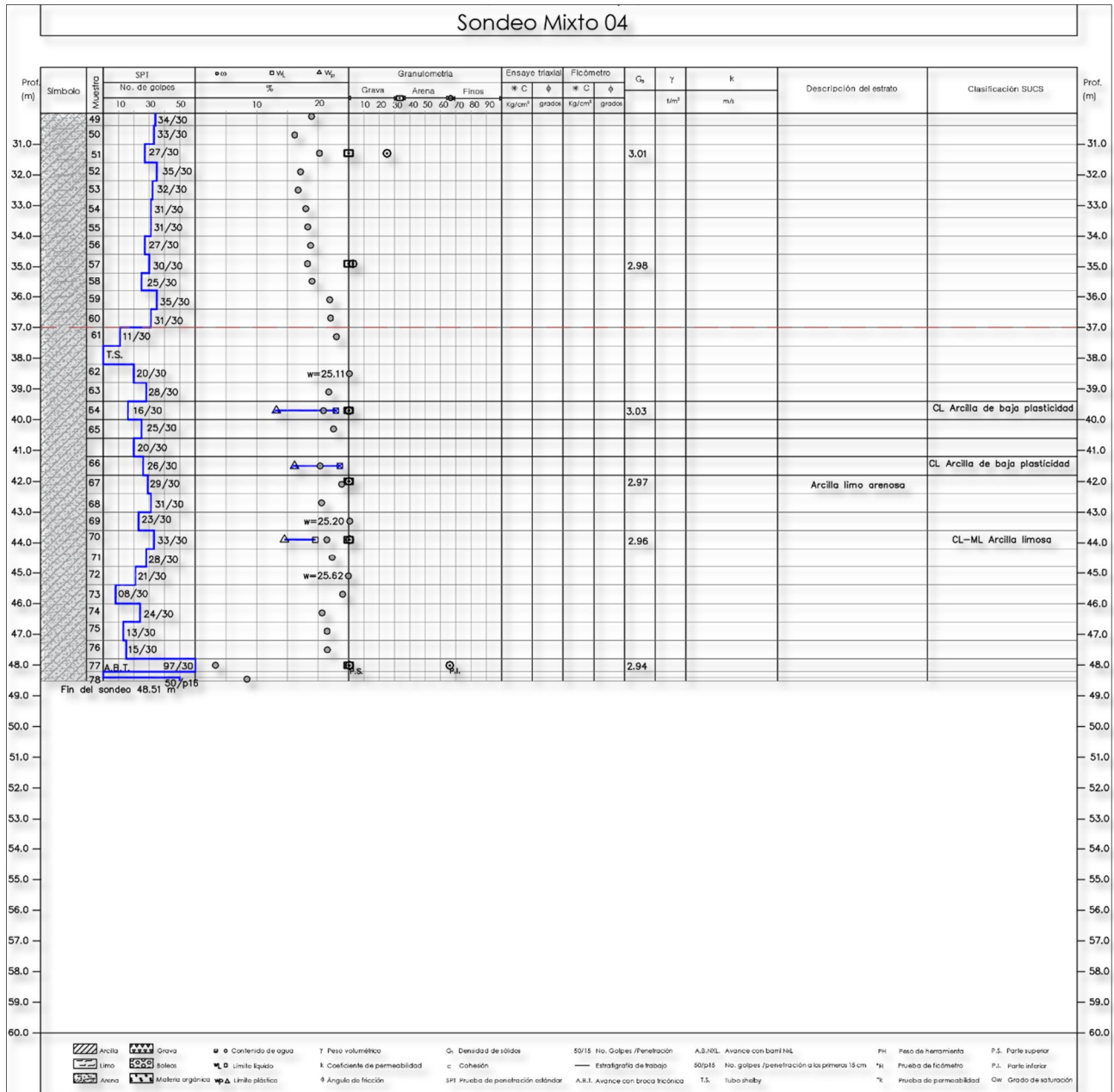


Figura 6.2.8 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 04. Flopac, 2015e.

### Sondeo mixto 5 (SM05).

De 0.00 - 6.00 m, arena limo arcillosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 4 a 20, contenido de agua de 5.62 a 14.69%, porcentajes de grava de 0%, finos de 19.20 a 54.75%, arena de 45.25 a 80.80%.

De 6.00 - 10.20 m, arena limo arcillosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 25, contenido de agua de 10.00 a 11.67%, porcentajes de grava de 0%, arena de 74.05% y finos de 54.75%. Se realizó una prueba de permeabilidad a los 10 m de profundidad, obtenido un coeficiente de permeabilidad (k) de  $2.13E-07$  m/s. De la prueba de ficómetro efectuada a 8 m de profundidad se obtuvieron los siguientes parámetros de cohesión(c) y fricción ( $\phi$ ) de  $c=0.54$  kg/cm<sup>2</sup> ,  $\phi=37.1^\circ$ .

De 10.20 - 14.40 m, arena limo arcillosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT de 6 a 25, contenido de agua de 13.53 a 16.86%, porcentajes de grava de 0%, arena de 15.85 a 46.74% y finos de 53.26 a 84.15%.

De 14.40 - 21.60 m, arena limo arcillosa, con número de golpes del ensaye SPT de 14 a 34, contenido de agua de 11.40 a 34.78%, porcentajes de grava de 0%, arena de 16.50 a 55.40% y finos de 44.60 a 46.95%. Se realizó una prueba de permeabilidad a los 20 m de profundidad arrojando un coeficiente de permeabilidad (k) de  $1.33E-08$  m/s. De la prueba de ficómetro efectuada a 17 m de profundidad se obtuvieron los siguientes parámetros de de cohesión(c) y fricción ( $\phi$ ) de  $c=2.05$  kg/cm<sup>2</sup> ,  $\phi=32.1^\circ$ .

De 21.60 - 40.40 m, arena limo arcillosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT entre 28 y mayores a los 50, contenido de agua de 10.77 a 15.54%, porcentajes de grava de 0%, arena de 24.60 a 69.60% y finos de 28.70 a 75.40%. Se realizaron pruebas de permeabilidad a 29 y 40 m de profundidad, arrojando coeficientes de permeabilidad (k) de  $7.54E-08$  y  $5.58E-08$  m/s, respectivamente. De las pruebas de ficómetro que se efectuaron a 30 y 37 m de profundidad se obtuvieron parametros de cohesión(c) y fricción ( $\phi$ ) de  $c=2.74$  kg/cm<sup>2</sup> ,  $\phi=28.8^\circ$  y  $c=2.50$  kg/cm<sup>2</sup> ,  $\phi=34.9^\circ$ , respectivamente.

De 40.40 - 53.20 m, arcilla limo arenosa color gris, con número de golpes del ensaye SPT entre 25 y mayores a los 50, contenido de agua de 13.14 a 23.71%, porcentajes de grava de 0%, arena de 11.90 a 14.25% y finos de 85.75 a 88.10%. Se realizó una prueba de permeabilidad a los 49 m de propfundidad, arrojando un coeficiente de permeabilidad (k) de  $4.50E-08$  m/s. De la prueba de ficómetro efectuada a 48 m de profundidad se obtuvieron los siguientes parámetros de de cohesión(c) y fricción ( $\phi$ ) de  $c=2.42$  kg/cm<sup>2</sup> ,  $\phi=30.9^\circ$ .

De 53.20 - 60.20 m, conglomerado color gris con porcentajes de recuperación (ROD) de 20 a 62%. Se realizaron pruebas de compresión simple en dos de las muestras recuperadas a 59 m y 59.20 m, la primera se clasificó como un conglomerado color gris con una resistencia a la compresión de 544.92 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la segunda se clasificó como un conglomerado color gris con una resistencia a la compresión de 232.50 kg/cm<sup>2</sup>.

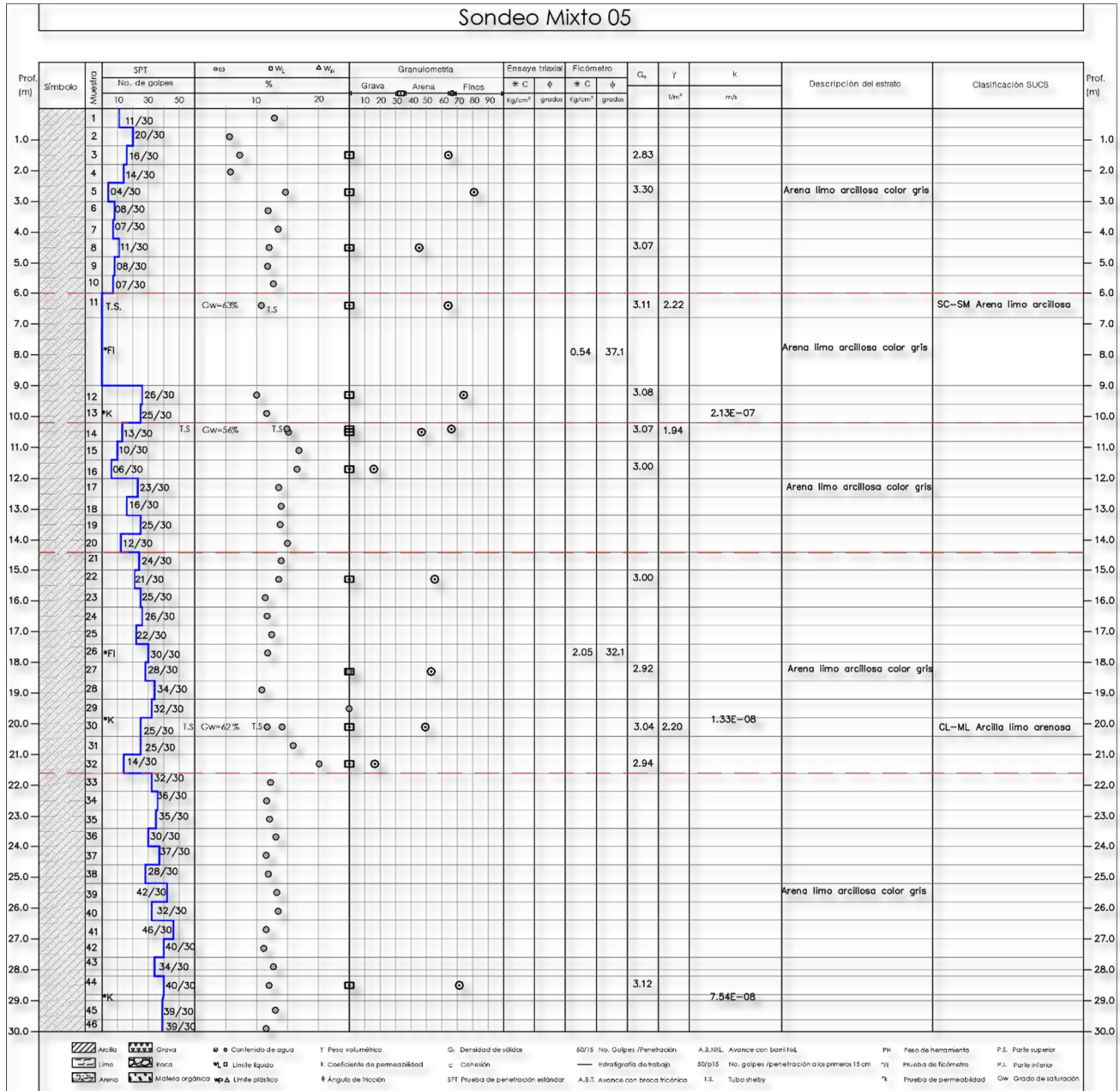


Figura 6.2.9 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 05. Flopac, 2015e.

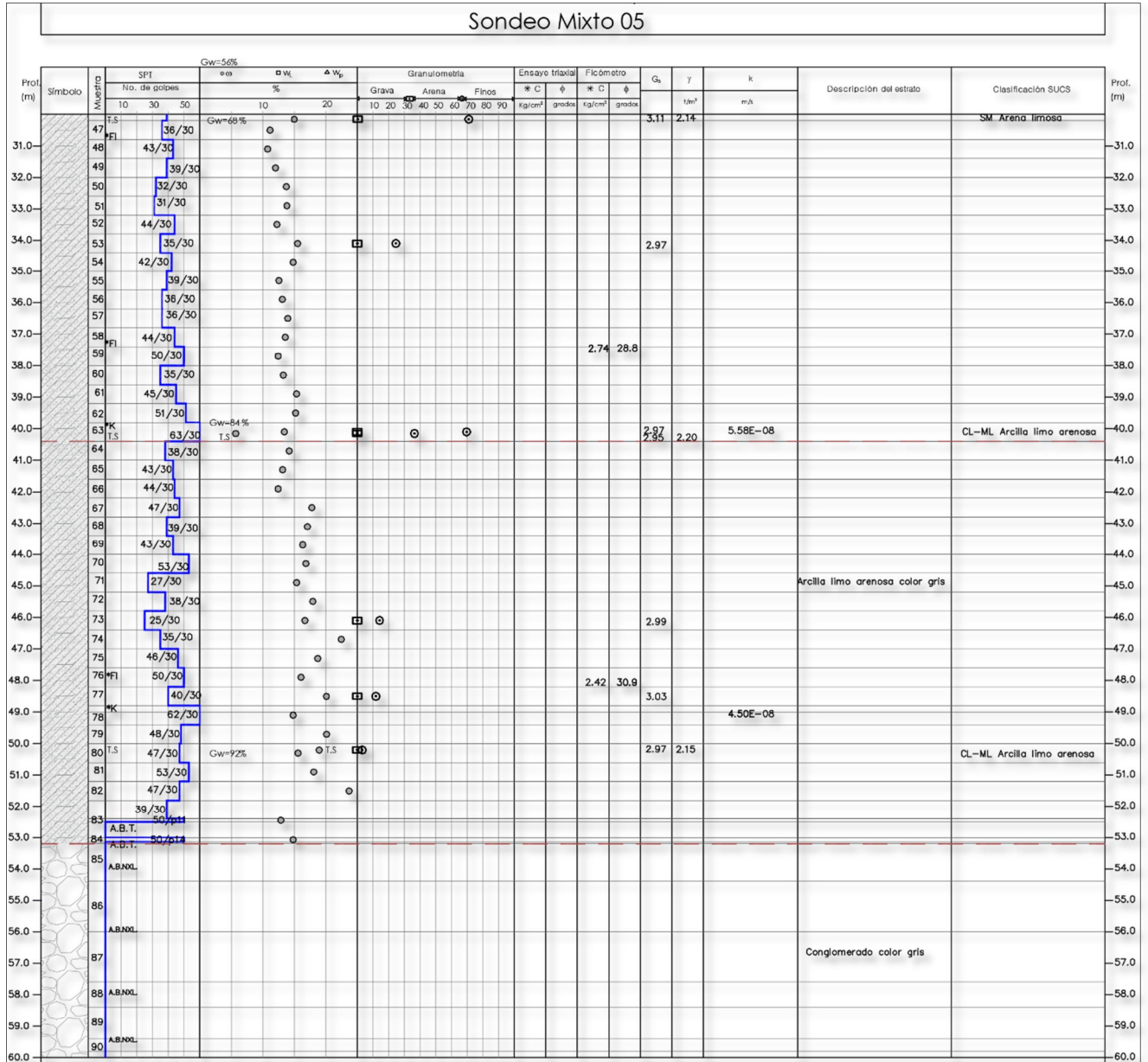


Figura 6.2.10 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 05, profundidad 60.20 m. Flopac, 2015e.

### **Sondeo mixto 6 (SM06).**

De 0.00 - 11.80 m, arena limo arcillosa, con número de golpes del ensaye SPT de 4 a 11, contenido de agua de 5.30 a 18.06%, porcentajes de grava de 0%, arena de 32.50 a 40.35% y finos de 42.45 a 67.50%.

De 11.80 - 17.80 m, arena limo arcillosa, con número de golpes del ensaye SPT de 3 a 29, contenido de agua de 11.72 a 16.65%, porcentajes de grava de 0%, arena de 12.20 a 60.80% y finos de 39.20 a 87.80%.

De 17.80 - 29.00 m, arena limo arcillosa, con número de golpes del ensaye SPT de 25 a 39, contenido de agua de 10.74 a 15.65%, porcentajes de grava de 0%, arena de 12.20 a 60.80% y finos de 39.20 a 87.80%.

De 29.00 - 31.90 m, arena limo arcillosa, con número de golpes del ensaye SPT de 39 a 46, contenido de agua de 5.32 a 22.69%, porcentajes de grava de 0%, arena de 48.25 a 64.45% y finos de 35.55 a 51.75%.

De 31.90 - 36.30 m, caliza color gris, con porcentajes de recuperación (ROD) de 45 a 44%. Se realizó una prueba de compresion simple de una de las muestras a la profundidad de 32.15 m , la roca se clasificó como una roza caliza color gris , con una resistencia a la comprensión simple de 356.38 kg/cm<sup>2</sup>.



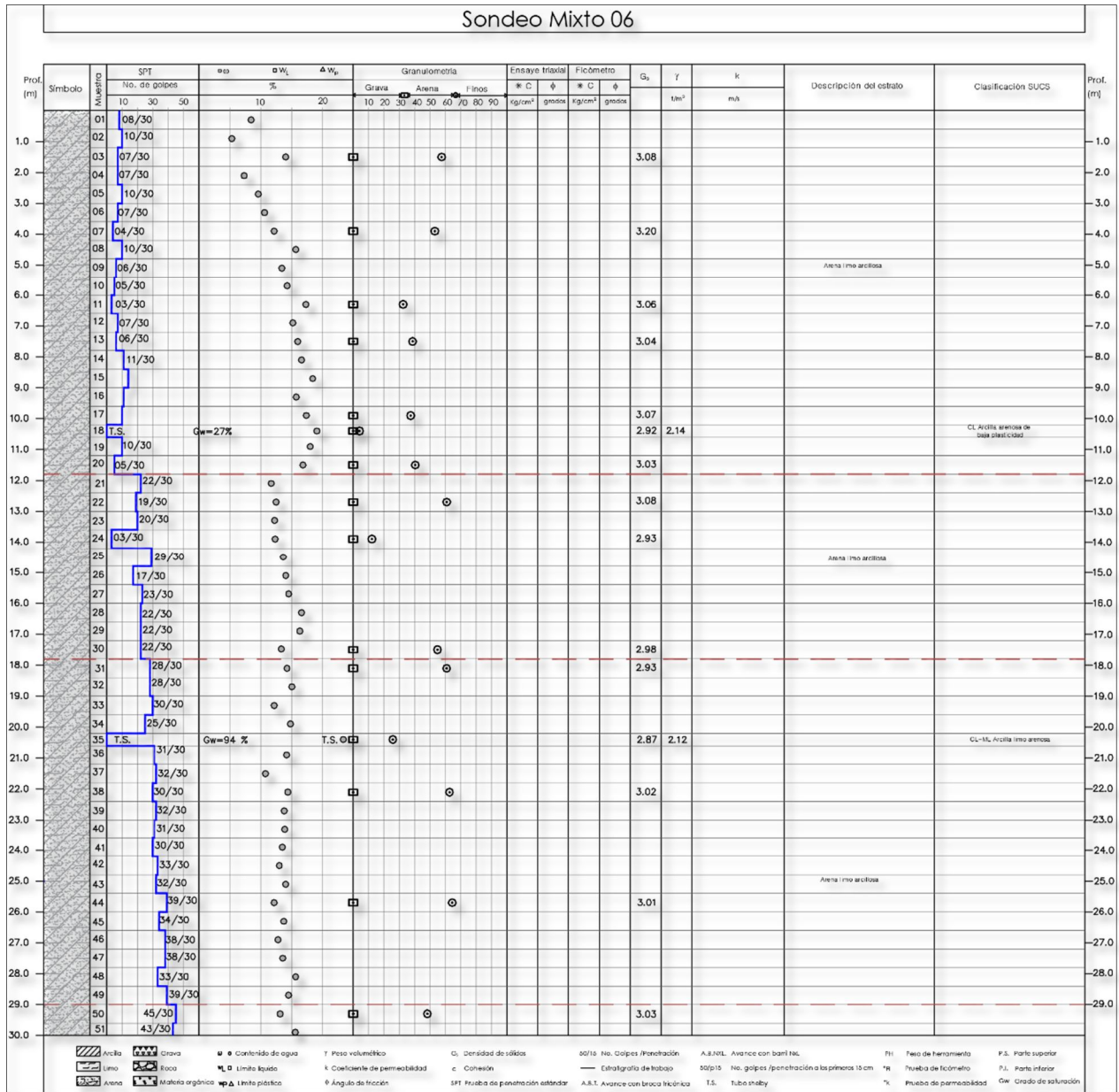


Figura 6.2.11 Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo mixto 06. Flopac, 2015e.

### 7. Determinación del perfil estratigráfico y parámetros de resistencia del corte a analizar.

Para poder caracterizar los materiales que comprenden el depósito actual y la ampliación se realizó una corte en la zona más desfavorable (figura 7.1 y 7.2). De este corte se obtuvo un perfil al cual se le asignaron parámetros para el análisis de estabilidad.

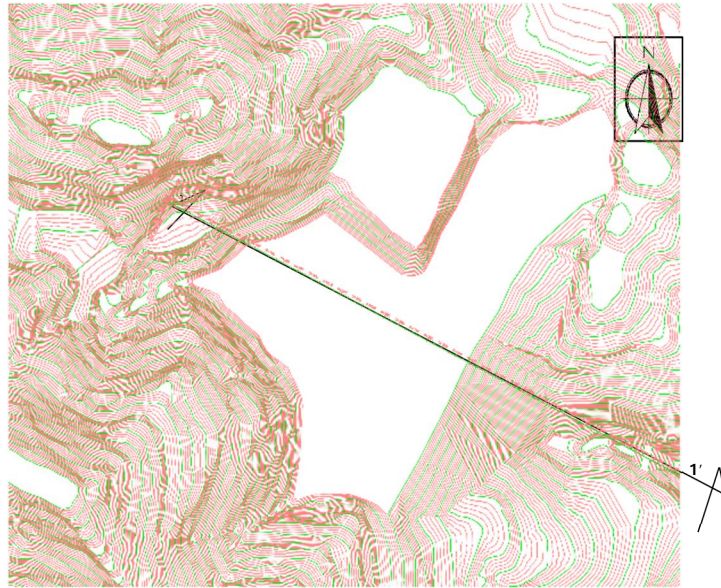


Figura 7.1 Corte 01, condiciones actuales. Flopac, 2015f.

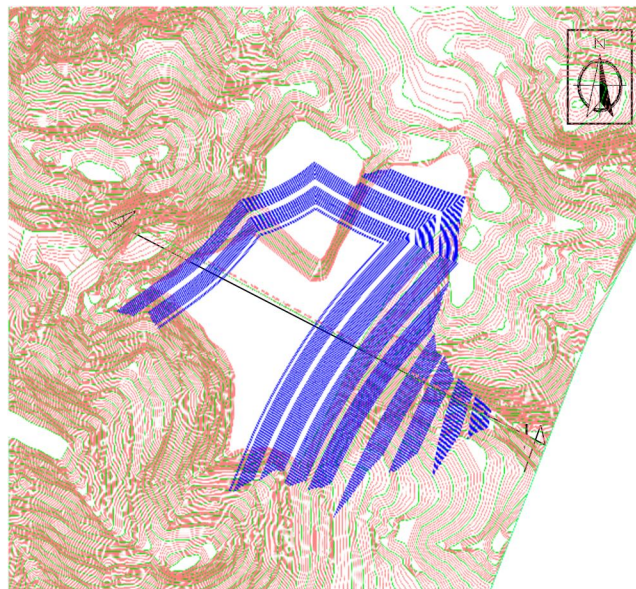


Figura 7.2 Corte 01, condiciones con sobre-elevación. Flopac, 2015f.

Con los resultados obtenidos de la campaña de exploración, de los obtenidos en laboratorio y gabinete se obtuvieron los parámetros de diseño que se utilizará en los análisis de estabilidad correspondientes.

### 7.1 Parámetros del depósito actual

El depósito actual se encuentra estable, los resultados de los sondeos mixtos que se llevaron a cabo sobre este depósito indican que se tiene un material con parámetros satisfactorios. Los pozos de observación instalados en los sondeos 02, 05 y 06, detectaron nivel de agua freática la cual será considerada para el análisis de estabilidad.

Los parámetros obtenidos para este modelo surgieron de la interpretación de los perfiles estratigráficos que se realizaron en cada uno de los sondeos mixtos, así como también de las pruebas efectuadas de laboratorio, los resultados geofísicos, de las correlaciones empíricas basadas en el número de golpes del ensayo SPT y de las pruebas en campo (ficómetro y permeabilidades). Los parámetros de la roca se determinaron con base a las pruebas de compresión simple que se realizaron a algunas de las muestras extraídas de los sondeos de roca.

La estratigrafía y parámetros correspondientes a cada estrato de este modelo se muestran en la figura 7.1.1 y en la tabla 7.1.1, respectivamente.

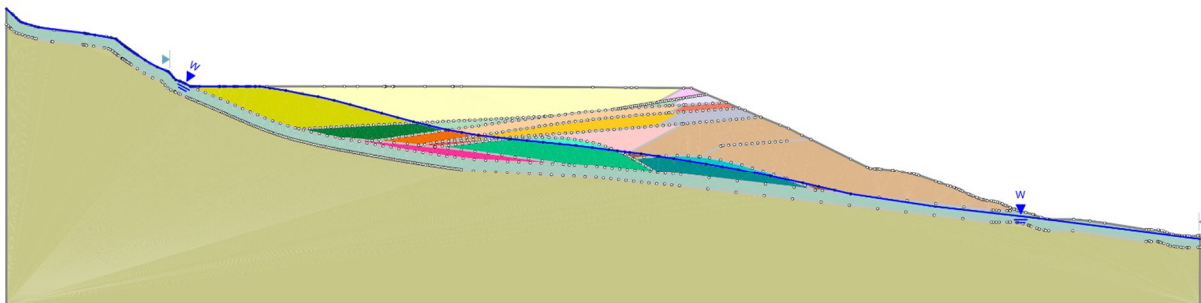

























Figura 7.1.1 Estratigrafía del depósito actual y parámetros asignados. Flopac, 2015f.

Tabla°7.1.1 Parametros asignados a la estratigrafía del depósito actual. Flopac, 2015f.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Sat. Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface
Limo arenoso1		20.2		Mohr-Coulomb	38	30	None
Arcilla limosa 2		20.2		Mohr-Coulomb	100	28	None
Arcilla limosa 3		20		Mohr-Coulomb	100	23	None
Arcilla limo-arenosa4		19.81		Mohr-Coulomb	100	23	None
Arcilla limo arenosa 5		20		Mohr-Coulomb	97	23	None
Arcilla limo arenosa 6		19.9		Mohr-Coulomb	74	23	None
Grava y gravilla 7		19.6		Mohr-Coulomb	0	36	Water Surface
Arcilla limo-arenosa8		21.2		Mohr-Coulomb	100	29	None
Arena limo arcillosa1'		19.8		Mohr-Coulomb	50	29	None
Arena limo arcillosa2'		21.57		Mohr-Coulomb	68	30	None
Arena limo arcillosa3'		19.31		Mohr-Coulomb	50	30	None
Arena limo arcillosa4'		21.57		Mohr-Coulomb	50	29	None
Arena limo arcillosa 5'		20.98		Mohr-Coulomb	50	30	None
Roca Caliza1		25.49		Mohr-Coulomb	0	35	Water Surface
Roca caliza2		28.97		Mohr-Coulomb	0	45	Water Surface
Arena limo arcillosa5'		20.98	20.98	Mohr-Coulomb	300	0	None
Arena limo arcillosa 8		21.2	21.2	Mohr-Coulomb	300	0	None
Arcilla arenosa 6		19.9	19.9	Mohr-Coulomb	100	0	None
limo_arenoso 1		20.2	20.2	Mohr-Coulomb	75	0	None
Arcilla limosa 2'		20.2	20.2	Mohr-Coulomb	200	0	None
Arcilla limosa 3'		20	20	Mohr-Coulomb	150	0	None
Arcilla limo arenosa 4'		19.81	19.81	Mohr-Coulomb	150	0	None
Arcilla limo arenosa 5'		20	20	Mohr-Coulomb	150	0	None

## 7.2 Parámetros de la ampliación

Para la geometría de la ampliación se generaron 8 bermas con pendientes 2:1, alturas de 15 m excepto la última con 10 m, anchos variables y recubrimientos de 2 m sobre las caras del talud y 0.50 m sobre las terrazas de las bermas, la cota máxima del depósito será de 1605 m.s.n.m. Al final del depósito se colocará un pequeño bordo de 6 m de ancho de corona y 1 m de altura, el necesario para cubrir el requisito que establece la NOM-141-SEMARNAT-2003, la cual hace énfasis en considerar un bordo libre para evitar que ocurra arrastre de partículas sobre las diferentes caras de los talud que conforman el depósito, el bordo libre de este depósito debe de ser como mínimo de un metro esto debido al tipo de zona en el que se encuentra.

La estratigrafía y parámetros correspondientes a cada estrato de este modelo se muestran en la figura 7.2.1 y en la tabla 7.2.1, respectivamente.

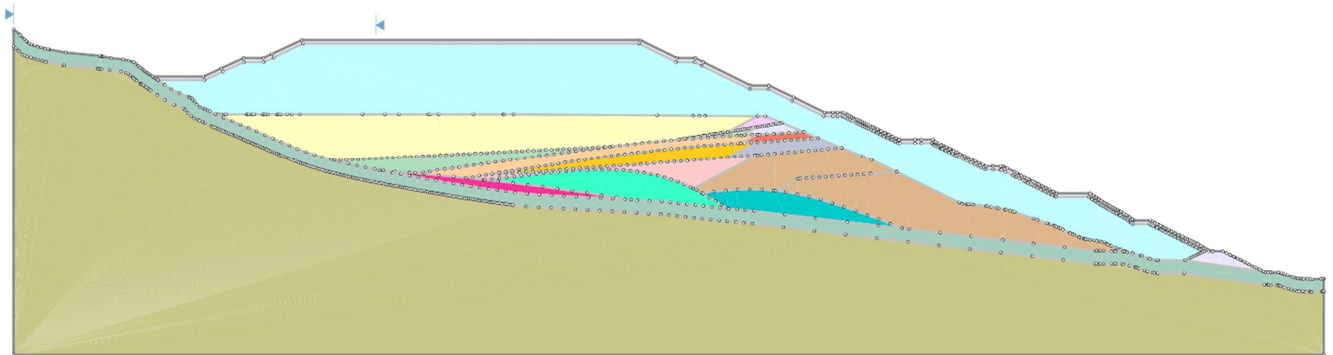














Figura 7.2.1 Estratigrafía del depósito con ampliación y parámetros asignados. Flopac, 2015f.



Tabla 7.2.1 Parametros asignados a la estratigrafía de la ampliación. Flopac, 2015f.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface
Limo arenoso1		20.2	Mohr-Coulomb	38	30	None
Arcilla limosa 2		20.2	Mohr-Coulomb	100	28	None
Arcilla limosa 3		20	Mohr-Coulomb	100	23	None
Arcilla limo-arenosa4		19.81	Mohr-Coulomb	100	23	None
Arcilla limo arenosa 5		20	Mohr-Coulomb	97	23	None
Arcilla limo arenosa 6		19.9	Mohr-Coulomb	74	23	None
Grava y gravilla 7		19.6	Mohr-Coulomb	0	36	None
Arcilla limo-arenosa8		21.2	Mohr-Coulomb	100	29	None
Arena limo arcillosa1'		19.8	Mohr-Coulomb	50	29	None
Arena limo arcillosa2'		21.57	Mohr-Coulomb	68	30	None
Arena limo arcillosa3'		19.31	Mohr-Coulomb	50	30	None
Arena limo arcillosa4'		21.57	Mohr-Coulomb	50	29	None
Arena limo arcillosa 5'		20.98	Mohr-Coulomb	50	30	None
Roca Caliza1		25.49	Mohr-Coulomb	242	32	None
Jal		19.81	Mohr-Coulomb	6.9	32	None
Bordo l		20	Mohr-Coulomb	50	34	None
Roca caliza2		28.97	Mohr-Coulomb	300	40	None

Como se puede apreciar en la figura 7.2.1 se conservan los estratos del modelo anterior, a este nuevo modelo se agregaron propiedades de el jal que será colocado y el bordo iniciador.

Para la caracterización del jal se interpretaron los resultados de laboratorio. Para el caso de el material que conformará el bordo iniciador se utilizará material de prestamo que tendrá que cumplir con una serie de requisitos hasta alcanzar los parametros mostrados en la figura 7.2.1.

Nota: el bordo libre no puede apreciarse en el modelo, pero si esta considerado en el análisis de estabilidad.

## 8. Análisis de estabilidad

### 8.1 Métodos de análisis de estabilidad de equilibrio límite

Actualmente, la mayoría de métodos de equilibrio límite dividen a la masa potencial de falla en un número finito de dovelas. Luego, las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y/o de momentos son aplicadas a cada dovela. En la figura 8.1.1 se presenta la manera tradicional de dividir la masa de falla en dovelas verticales; además, se incluyen las fuerzas actuantes en una dovela (fuerzas interdovelas).

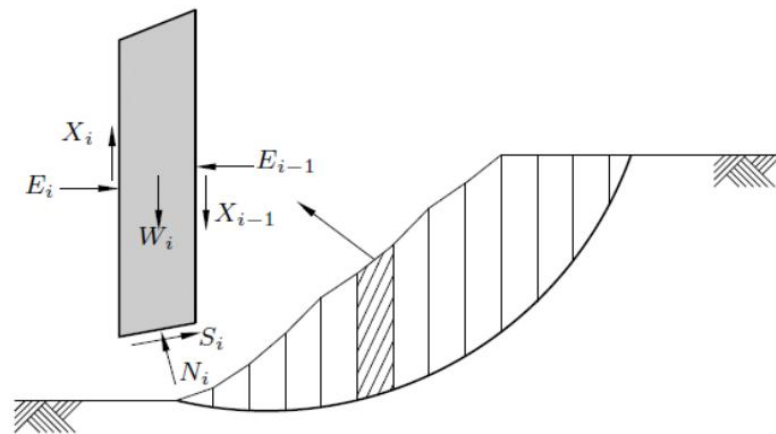


Figura 8.1.1 Fuerzas involucradas en el análisis de estabilidad por el método GLE.

En esta metodología, tres ecuaciones de equilibrio pueden ser empleadas, éstas son: equilibrio de fuerzas horizontales, equilibrio de fuerzas verticales y equilibrio de momentos.

Las múltiples formulaciones existentes de equilibrio límite basado en dovelas tienen características similares que emplean. Estas consideraciones comunes incluyen:

- La masa potencial de falla es dividida en un número finito de dovelas.
- La masa de falla actúa como un cuerpo rígido.
- Las fuerzas normales actúan en el centro de la base de las dovelas.
- La resistencia a lo largo de la superficie de falla es distribuida con el mismo factor de seguridad.

- Supuestos con relación a las fuerzas interdovelas son empleados para hacer el problema estáticamente determinado.
- El factor de seguridad es determinado a partir de las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y/o momentos.
- Se emplean métodos interactivos, tipo prueba-error, para la solución del factor de seguridad.
- Una vez se obtiene el valor del Factor de Seguridad de la superficie considerada, se supone una segunda superficie circular y se determina un nuevo valor de FS; y así sucesivamente hasta obtener un mínimo. Normalmente, las ecuaciones se programan y se analizan círculos con diferentes radios y centros, hasta que se consigue el que proporciona un valor del Factor de Seguridad mínimo.

A pesar de que estos métodos emplean los mismos conceptos, se ha observado que los diferentes métodos desarrollados dan, en ocasiones, diferente ubicación de la superficie de falla y diferentes valores del factor de seguridad. Es por ello que antes de aceptar la solución como válida, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- La ubicación de la línea de acción de fuerzas (thrust-line), línea que conecta los puntos de aplicación de las fuerzas interdovelas debe estar dentro de la masa de falla.
- La distribución de las fuerzas interdovelas.
- La distribución de las fuerzas normales y tangenciales a lo largo de la superficie de falla.

En estos últimos tres aspectos se debe comprobar que los resultados sean físicamente admisibles y que no presenten saltos o cambios bruscos de dirección.

Algunas de las técnicas de dovelas usan una o dos ecuaciones de equilibrio, haciendo la solución "no rigurosa". Sin importar el procedimiento empleado para resolver el sistema de ecuaciones en los métodos de equilibrio límite, existirán más incógnitas que número de ecuaciones de equilibrio, haciendo la resolución de la estabilidad un problema estáticamente indeterminado. Generalmente, esta desigualdad resuelta introduciendo arbitrariamente algunas simplificaciones en la ubicación y/o en la inclinación de las fuerzas interdovelas. Todos los métodos "rigurosos", aquellos que satisfacen las tres ecuaciones de equilibrio, como el método de Spencer y de Morgenstern y Price, entre otros, determinan valores del factor de seguridad (Fs) muy similares entre ellos. Para el caso en el que la superficie de falla sea circular,

el método Simplificado de Bishop, que emplea únicamente dos ecuaciones de equilibrio (fuerzas verticales y momentos), produce valores del factor de seguridad que están en correspondencia con los métodos rigurosos, siendo las diferencias máximas entre el 5 y 6%, para una variedad de casos. Esto es debido a que para una superficie de falla circular el valor del factor de seguridad es afectado de una manera marginal por la simplificación de las fuerzas interdovelas. Cuando no se conoce de antemano el tipo de falla, como es en la mayoría de los casos prácticos, los métodos rigurosos como el de Morgenstern y Price y Spencer deben ser usados, pues se obtienen valores consistentes y no presentan mayores dificultades numéricas.

Para establecer la diferencia y detalles entre los métodos de análisis aplicados es necesario recurrir a la formulación del método General de Equilibrio Límite (GLE), desarrollada por Fredlund. Se fundamenta en la formulación de dos ecuaciones de factores de seguridad. Una de ellas proporciona el factor de seguridad con respecto al equilibrio de momentos ( $F_m$ ), mientras que la otra proporciona el factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerzas horizontales ( $F_f$ ).

Las fuerzas cortantes entre las dovelas en el método GLE son obtenidas por la ecuación propuesta por Morgenstern y Price (1965),

$$X = E\lambda f(x) \quad [1]$$

Donde,  $f(x)$  es una función,  $\lambda$  es el porcentaje de la función usada, E es la fuerza normal y X es la fuerza cortante, ambas entre dovelas.

El factor de seguridad con respecto al equilibrio de momentos se obtiene mediante la ecuación,

$$F_m = \frac{\Sigma(c' \beta R + (N - u\beta)R \tan \phi')}{\Sigma Wx - \Sigma Nf \pm \Sigma Dd} \quad [2]$$

La ecuación que define el factor de seguridad con respecto a las fuerzas horizontales es la siguiente (figura 1),

$$F_f = \frac{\Sigma(c' \beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha - \Sigma D \cos \omega} \quad [3]$$

donde,

$c'$  Cohesión efectiva.

$\phi'$  Ángulo de fricción efectivo.

$u$  Presión de poro.

$N$  Fuerza normal en la base de la dovela.

$W$  Peso de la dovela.

$D$  Carga lineal.

$\beta, R, x, f, d, \omega$  Parámetros geométricos.

$\alpha$  Inclinación de la base de la dovela.

Una de las variables fundamentales en ambas ecuaciones es  $N$ , la normal a la base de cada dovela. Esta ecuación se obtiene mediante la suma de las fuerzas verticales. La normal se determina mediante,

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \quad [4]$$

$F$  es  $F_m$  cuando  $N$  es sustituido en la ecuación del factor de seguridad de momentos y  $F$  es  $F_f$  cuando  $N$  es sustituido en la ecuación del factor de seguridad de fuerzas.

La normal es dependiente de las fuerzas cortantes entre dovelas y, consecuentemente difiere en función del método a aplicar.

El método GLE puede aplicarse a cualquier forma de superficie de falla cinemáticamente admisible. La importancia de la ecuación de fuerzas entre dovelas está fuertemente relacionada con la forma de la superficie de falla.

Los resultados de aplicar diferentes métodos al GLE se traducen en factores de seguridad distintos.



## 8.2 Método Ordinario de Fellenius

Este método es conocido como el Método Sueco o de las Dovelas. En este método todas las fuerzas entre dovelas se ignoran. El peso de la dovela se descompone en fuerzas paralelas y perpendiculares a la base de la dovela. La fuerza perpendicular a la base de la dovela es la fuerza normal usada para determinar la fuerza cortante. La componente del peso de la dovela paralela a la base es la fuerza gravitacional actuante. La suma de momentos con respecto a un punto fijado aleatoriamente para la superficie de falla es empleado para obtener el factor de seguridad. El factor de seguridad es la resistencia total disponible a lo largo de la superficie de falla dividida entre la sumatoria de la fuerza gravitacional actuante.

La forma más simple de la ecuación del factor de seguridad Ordinario en ausencia de cualquier presión de poro, para una superficie circular, es la siguiente,

$$FS = \frac{\Sigma[c\beta + N \tan \phi]}{\Sigma W \sin \alpha} = \frac{\Sigma S_{resistente}}{\Sigma S_{movilizado}} \quad [5]$$

Donde:

- c Cohesión.
- $\phi$  Ángulo de fricción.
- $\beta$  Longitud de la base de la dovela.
- N Fuerza normal en la base de la dovela ( $W \cos \alpha$ ).
- W Peso de la dovela.
- $\alpha$  Inclinación de la base de la dovela.

Se destaca que debido a la omisión de fuerzas actuantes entre dovelas, el método Ordinario debe ser empleado sólo como una referencia, pues debido a sus limitaciones puede proporcionar factores de seguridad ajenos a la realidad.

### 8.3 Método de Bishop

Bishop desarrolló en el 1955 un método de dovelas, el Método de Bishop, con las siguientes hipótesis:

- Se supone una superficie de ruptura circular.
- La masa deslizante se divide en dovelas o bloques verticales.
- Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo.
- A partir de la condición de equilibrio de fuerzas verticales de cada rebanada se obtienen las fuerzas N (normales a la superficie de ruptura) y se sustituyen a la ecuación resultante del equilibrio de momentos.
- El Método de Bishop Simplificado ignora las tensiones tangenciales entre rebanadas. Por otro lado, considera las normales (figura 8.3.1).

Una vez se obtiene el valor del Factor de Seguridad de la superficie considerada, se supone una segunda superficie circular y se determina un nuevo valor de FS; y así sucesivamente hasta obtener un mínimo.

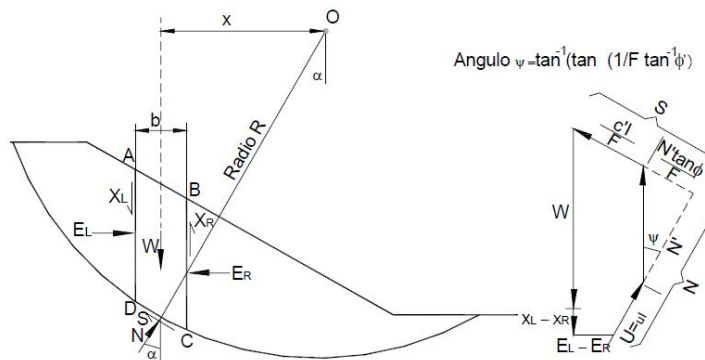


Figura 8.3.1 Fuerzas actuantes en una dovela.

Como se observa, FS aparece en ambos lados de la ecuación. Ésta difiere de la ecuación del factor de seguridad Ordinario por el término  $m_\alpha$  que se define como,

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS} \quad [6]$$

Para obtener el factor de seguridad del método de Bishop es necesario partir de un FS supuesto. En los análisis realizados el FS inicial es el obtenido con el método Ordinario. El FS inicial se aplica

para obtener  $m_\alpha$  y posteriormente el nuevo FS. Este proceso se repite calculando nuevamente  $m_\alpha$  y después el FS, hasta que el último FS es similar al FS previo considerando un nivel de tolerancia admisible. En la mayoría de los casos se realizan pocas iteraciones para lograr que la solución converja.

Como se indicó, el método de Bishop considera las fuerzas normales entre dovelas, pero ignora las fuerzas cortantes, satisfaciendo el equilibrio de momentos, pero no el equilibrio de fuerzas horizontales.

#### **8.4 Método de Janbu**

El método de Janbu es similar al método de Bishop, excepto que el de Janbu satisface sólo el equilibrio de fuerzas horizontales, pero no el equilibrio de momentos de volteo.

El método de Janbu genera factores de seguridad escasos para superficies de falla circulares, debido a que el equilibrio de fuerzas es sensible a las fuerzas cortantes entre dovelas.

El método Simplificado de Janbu considera las fuerzas normales entre dovelas, pero ignora las fuerzas cortantes entre estos elementos.

#### **8.5 Método de Spencer**

Spencer desarrolló dos ecuaciones de factores de seguridad, una con respecto al equilibrio de momentos y otra con respecto al equilibrio de fuerzas horizontales. Adoptó una relación constante entre las fuerzas normales y cortantes entre dovelas, y a través de un proceso iterativo alteró la relación entre las normales y cortantes entre dovelas, hasta que los dos factores de seguridad fueran el mismo, encontrando la relación normal-cortante los dos factores de seguridad son iguales, lo que significa que ambos equilibrios de fuerzas y momentos son satisfechos (figura 8.5.1).

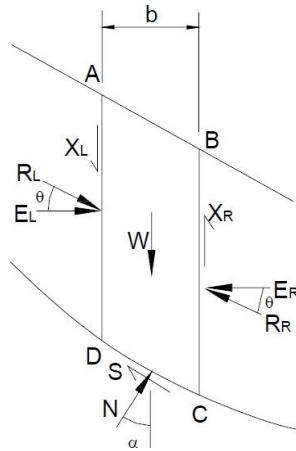


Figura 8.5.1 Fuerzas actuantes en una dovela por el método de Spencer.

## 8.6 Método de Morgenstern-Price

Morgenstern y Price desarrollaron un método similar al de Spencer, con diferentes funciones de variación de las fuerzas entre dovelas.

Las funciones de las fuerzas entre dovelas disponibles para este análisis con el método de Morgenstern-Price, son las siguientes:

- Constante.
- Mitad de la función seno.
- Máxima de la función seno.
- Trapezoidal.
- Punto específico.

Al seleccionar la función constante, el método M-P es idéntico al método de Spencer.

Se destaca que el Método de Morgenstern-Price considera las fuerzas normales y cortantes en la interface entre las dovelas, satisface el equilibrio de fuerzas y momentos, además de permitir emplear diferentes funciones para las fuerzas entre dovelas, por lo que es el más utilizado para realizar análisis de estabilidad.

## 9. Acción sísmica

Con objeto de establecer la magnitud del incremento de fuerzas y momentos actuantes generados por la acción del sismo de diseño sobre la masa vulnerable deslizante del depósito en estudio, se definió la fuerza sísmica horizontal para cada dovela a partir de la expresión siguiente,

$$F = m a_0 \quad [7]$$

Donde:

F fuerza sísmica.

m masa deslizante.

$a_0$  aceleración del terreno para el sismo de diseño.

De acuerdo al espectro de diseño obtenido de la campaña de exploración geofísica, se obtuvo una fuerza equivalente de 0.06g, para efectos de análisis se empleó el valor de 0.1g, aplicada en cada una de las dovelas analizadas, donde g es la aceleración de la gravedad de (9.8 m/s<sup>2</sup>).

## 10. Analisis de estabilidad de la zona en estudio

En este apartado se mostraran los resultados del análisis de estabilidad efectuado sobre el deposito actual y sobre la ampliación propuesta, el análisis se efectuó mediante el programa Slide 5.0 y se empleó el método general de equilibrio limite (GLE).

Los parámetros asignados para el análisis de estabilidad se obtuvieron de la interpretación de la estratigrafía analizada en el apartado 7.

El análisis se realizó en la sección más crítica, cuyo eje y parámetros se muestran en las figuras 10.1, 10.2 y tablas 10.1 y 10.2. El análisis se efectuó con la geometría que se tenía en el momento en el que se realizó el levantamiento topográfico y con la conformación final de la ampliación del depósito de 1605 m.s.n.m., se consideraron bermas de 15 m de altura con variaciones en el ancho de cada una de ellas, pendientes 2:1 (horizontal: vertical), y recubrimiento de 2 m de espesor. Para el análisis accidental por sismo se consideraron 4/3 de la aceleración en la superficie del terreno, valor que se tomó del espectro de sitio obtenido del estudio geofísico.



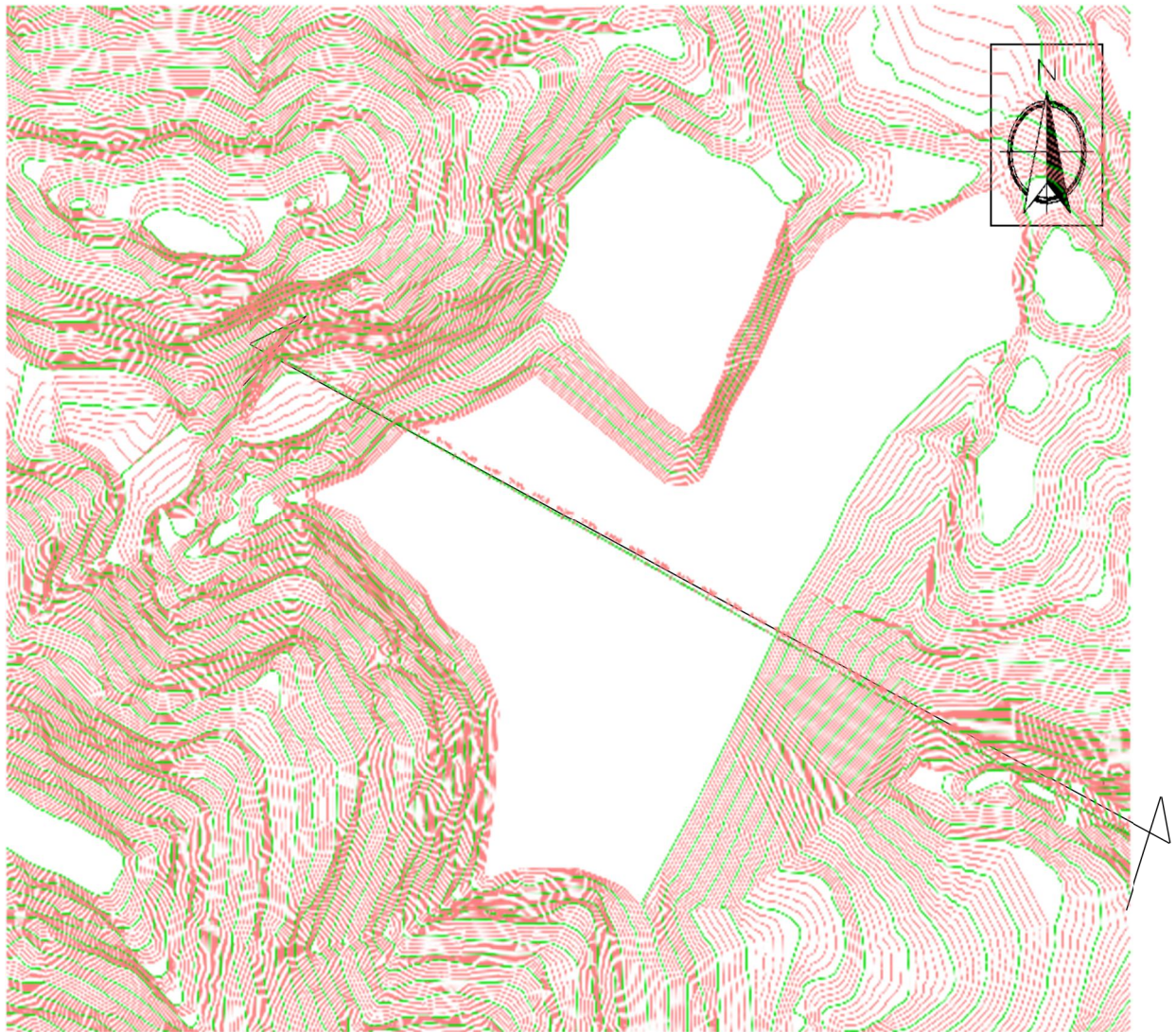


Figura 10.1 Corte 01, condiciones actuales. Flopac, 2015f.



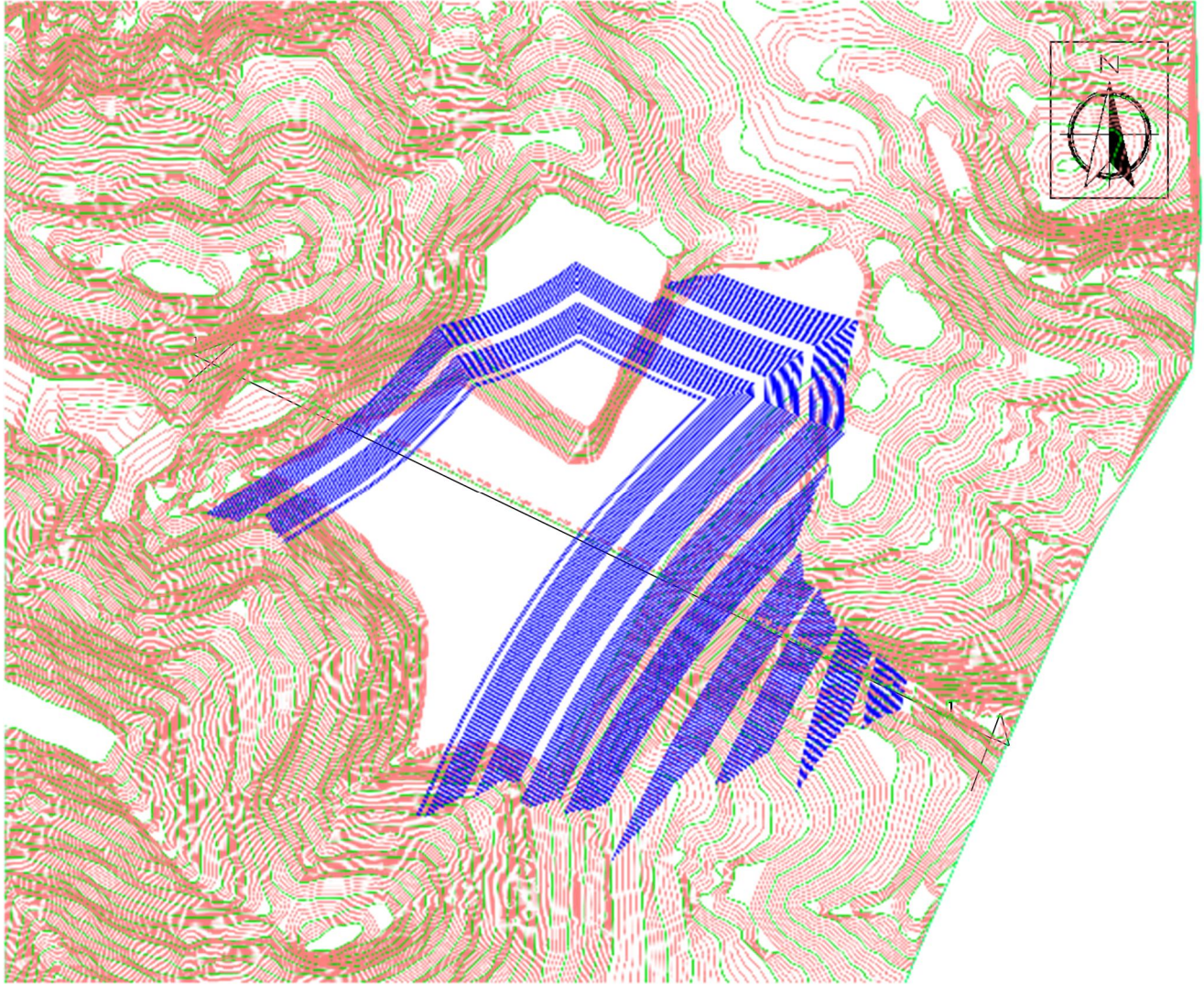


Figura 10.2 Corte 01, condiciones con sobre-elevación. Flopac, 2015f.

En la figura 10.3 se muestra el modelo geotécnico de la ampliación del depósito en el eje más desfavorable, donde se representa cada uno de los materiales que conforman el depósito y la geometría de la cortina. En la figura 10.4 se muestra esquemáticamente el círculo de falla más desfavorable para las condiciones geométricas y de resistencia de los materiales mostrados en la figura 10.4.

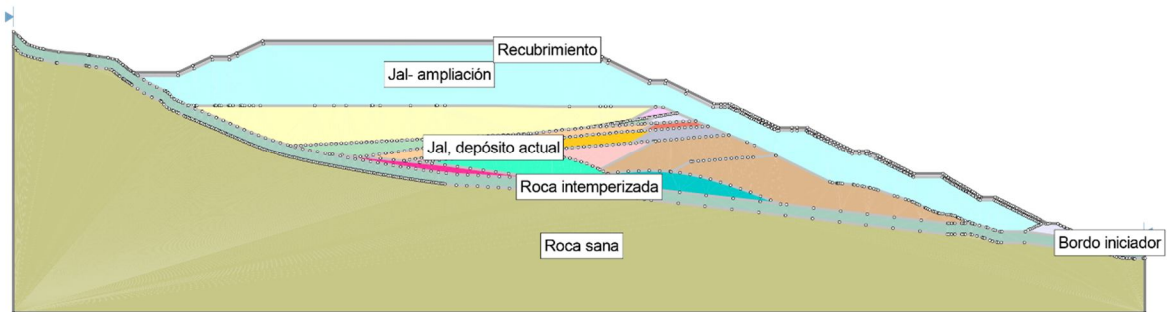


Figura 10.3 Modelo Geotécnico de la ampliación del depósito de jales. Flopac, 2015f.

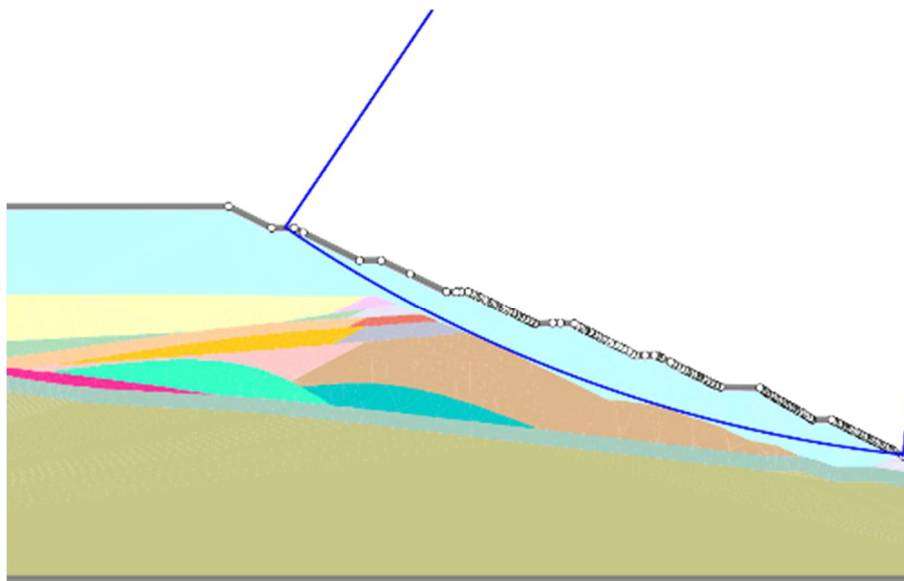


Figura 10.4 Círculo de falla para el modelo de la ampliación,  $FS=1.899$  condición estática. Flopac, 2015f.

Tabla 10.1 Parámetros considerados para el análisis de estabilidad del depósito actual.  
Flopac, 2015f.
























Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Sat. Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface
Limo arenoso1		20.2		Mohr-Coulomb	38	30	None
Arcilla limosa 2		20.2		Mohr-Coulomb	100	28	None
Arcilla limosa 3		20		Mohr-Coulomb	100	23	None
Arcilla limo-arenosa4		19.81		Mohr-Coulomb	100	23	None
Arcilla limo arenosa 5		20		Mohr-Coulomb	97	23	None
Arcilla limo arenosa 6		19.9		Mohr-Coulomb	74	23	None
Grava y gravilla 7		19.6		Mohr-Coulomb	0	36	Water Surface
Arcilla limo-arenosa8		21.2		Mohr-Coulomb	100	29	None
Arena limo arcillosa1'		19.8		Mohr-Coulomb	50	29	None
Arena limo arcillosa2'		21.57		Mohr-Coulomb	68	30	None
Arena limo arcillosa3'		19.31		Mohr-Coulomb	50	30	None
Arena limo arcillosa4'		21.57		Mohr-Coulomb	50	29	None
Arena limo arcillosa 5'		20.98		Mohr-Coulomb	50	30	None
Roca Caliza1		25.49		Mohr-Coulomb	0	35	Water Surface
Roca caliza2		28.97		Mohr-Coulomb	0	45	Water Surface
Arena limo arcillosa5'		20.98	20.98	Mohr-Coulomb	300	0	None
Arena limo arcillosa 8		21.2	21.2	Mohr-Coulomb	300	0	None
Arcilla arenosa 6		19.9	19.9	Mohr-Coulomb	100	0	None
limo_arenoso 1		20.2	20.2	Mohr-Coulomb	75	0	None
Arcilla limosa 2'		20.2	20.2	Mohr-Coulomb	200	0	None
Arcilla limosa 3'		20	20	Mohr-Coulomb	150	0	None
Arcilla limo arenosa 4'		19.81	19.81	Mohr-Coulomb	150	0	None
Arcilla limo arenosa 5'		20	20	Mohr-Coulomb	150	0	None

Tabla 10.2 Parámetros considerados para el análisis de estabilidad de la ampliación.  
Flopac, 2015f.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface
Limo arenoso1		20.2	Mohr-Coulomb	38	30	None
Arcilla limosa 2		20.2	Mohr-Coulomb	100	28	None
Arcilla limosa 3		20	Mohr-Coulomb	100	23	None
Arcilla limo-arenosa4		19.81	Mohr-Coulomb	100	23	None
Arcilla limo arenosa 5		20	Mohr-Coulomb	97	23	None
Arcilla limo arenosa 6		19.9	Mohr-Coulomb	74	23	None
Grava y gravilla 7		19.6	Mohr-Coulomb	0	36	None
Arcilla limo-arenosa8		21.2	Mohr-Coulomb	100	29	None
Arena limo arcillosa1'		19.8	Mohr-Coulomb	50	29	None
Arena limo arcillosa2'		21.57	Mohr-Coulomb	68	30	None
Arena limo arcillosa3'		19.31	Mohr-Coulomb	50	30	None
Arena limo arcillosa4'		21.57	Mohr-Coulomb	50	29	None
Arena limo arcillosa 5'		20.98	Mohr-Coulomb	50	30	None
Roca Caliza1		25.49	Mohr-Coulomb	242	32	None
Jal		19.81	Mohr-Coulomb	6.9	32	None
Bordo I		20	Mohr-Coulomb	50	34	None
Roca caliza2		28.97	Mohr-Coulomb	300	40	None

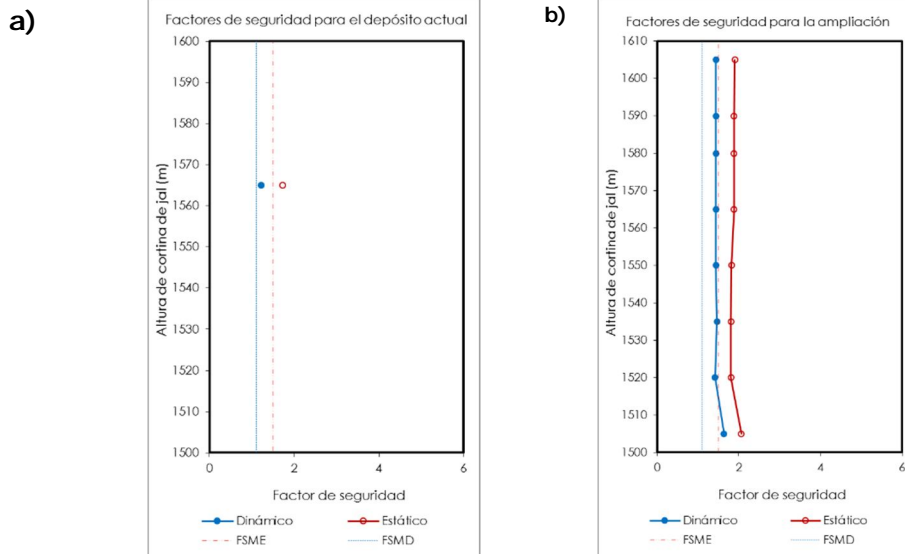


En la tabla 10.1 se muestran los resultados obtenidos en cada una de las etapas que conformarán la ampliación del depósito, y en la figura 10.5 se encuentra la representación gráfica de estos resultados.

Los análisis correspondientes a cada una de las etapas se encuentran en el Anexo 2 de este informe.

Tabla 10.3. Factores de seguridad para las diferentes condiciones del depósito. Flopac, 2015f.

Corte	Depósito	Etapa	bermas	Elevación m.s.n.m	FS según tipo de análisis	
					Estático	Dinámico
1	Actual	E-01-1	-	1565	1.725	1.225
	Ampliación	E-02-1	1	1505	2.059	1.638
	Ampliación	E-02-2	2	1520	1.803	1.416
	Ampliación	E-02-3	3	1535	1.803	1.466
	Ampliación	E-02-4	4	1550	1.819	1.435
	Ampliación	E-02-5	5	1565	1.881	1.434
	Ampliación	E-02-6	6	1580	1.881	1.434
	Ampliación	E-02-7	7	1590	1.881	1.434
	Ampliación	E-02-8	8	1605	1.899	1.434



FSMD= Factor de seguridad mínimo recomendado para diseño dinámico  
 FSME= Factor de seguridad mínimo recomendado para diseño estático

Figura 10.5 a) factores de seguridad de la etapa actual y b) factores de seguridad correspondientes a la ampliación del depósito de jales en estudio. Flopac, 2015f.

## 11. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se aprecia que tanto para el depósito actual como para la ampliación de éste, los factores de seguridad son satisfactorios, mayores a los recomendados por el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (MOC, 2008), el cual considera que para el análisis estático se tengan factores de seguridad (FS) mayores o iguales a 1.5 y para la condición dinámica mayores o iguales a 1.1. Por lo que el depósito es estable para las condiciones analizadas.

Es importante mencionar que para poder conservar estos factores de seguridad, se deberá de monitorear que la línea superior de corriente permanezca constante y evitar que se acumulen espejos de agua sobre el depósito ya que si el agua llega a saturar el jal prensado podría ocasionar una disminución considerable en la resistencia del suelo afectando directamente la estabilidad de la estructura.

## 12. Bibliografía

Flopac, (2015a), Informe final de la presa de jales en estudio. Flopac Ingeniería S.A. de C.V.

Flopac (2015b), Reporte de la exploración de mecánica de suelos realizada en la presa de jales en estudio. Flopac Ingeniería S.A. de C.V.

Flopac (2015c), Estudio geofísico realizado en la zona de estudio. Flopac Ingeniería S.A. de C.V.

Flopac (2015d), Primer avance de las pruebas de laboratorio. Flopac Ingeniería S.A. de C.V.

Flopac (2015e), Segundo avance de las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras recuperadas de los sondeos de mecánica de suelos afectados para caracterizar el terreno sobre el que se construirá la cortina y el vaso de almacenamiento de la presa de jales en estudio. Flopac Ingeniería S.A. de C.V.

Flopac (2015f), Análisis de estabilidad para el depósito de jales actual y la ampliación de la presa de jales en estudio. Flopac Ingeniería S.A. de C.V.

González de Vallejo, Luis I. (2002) Ingeniería Geológica; Pearson, Prentice Hall; Madrid; pp. 715.

Sheriff, Robert E.; Geldart L. P. (1991). Exploración Sismológica Volumen I y Volumen II. Ed. Limusa.

Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo. (2008) Comisión Federal de Electricidad, CFE.

Gonzales de Vallejo Luis (2002). Ingeniería geológica. México, Prentice Hall. 362 pp.

Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México. Tomson Learning. 594 pp.

Lambe, T., Withman, R. (2002). *Mecánica de Suelos*. México. Editorial Limusa. 582 pp.

Peck, R., Hanson, W., Thornburn, T. (2004). *Ingeniería de cimentaciones*. México. Editorial Limusa. 557 pp.

Rico, A., Del Castillo, H. (2003). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. México. Limusa. 643 pp.

MOC- (2008). *Manual de obras civiles. Diseño por sismo*". Comisión Federal de Electricidad. Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, D.F.

SMIG (2001), Almacenamiento de Residuos mineros en México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., 19,33, 34, 35 pp.

## GLOSARIO

**Bordo iniciador:** Estructura inicial de la cortina contenedora.

**Caracterización:** Determinación cualitativa o cuantitativa de la distribución de un parámetro.

**Cortina contenedora:** Estructura contenedora que delimita y soporta el empuje de los jales y del agua almacenada.

**Filtro:** Elemento estructural formado por gravas y arenas bien graduadas cuya función es permitir el paso de agua sin generación de presión de poro inadecuado e impedir la migración de jales y/o suelos finos.

**Jales:** Residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales.

**Mena:** Cuerpo de roca de composición mineralógica uniforme, generalmente metálica, que en forma de cuerpo continuos forma parte de las reservas económicas de un yacimiento.

**Planta de beneficio:** Lugar donde se realizan los trabajos para preparación, tratamiento y fundición de primera mano de productos minerales, en cualquiera de sus fases, con el propósito de recuperar u obtener minerales o sustancias, al igual que de elevar la concentración y pureza de sus contenidos.

**Playa:** Es el espacio existente entre la corona de la cortina contenedora y el nivel de aguas máximas ordinarias o de operación.

**Presa de jales:** Obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente.

**Sistema decantador drenante:** Obra de ingeniería que tiene como función el captar el agua de los jales y enviarla a la pileta de recuperación para su utilización en el proceso de la planta de beneficio. También puede funcionar como vertedor de excedencias para desalojar el agua de la tormenta máxima probable.

**Vaso de almacenamiento:** Elemento de la presa de jales que tiene volumen disponible para almacenar los sólidos de los jales, una porción de agua empleada en su transporte y el volumen para manejar las aguas pluviales que caen dentro de la presa de jale.

**Vertedor de excedencias:** Obra de ingeniería que tiene como propósito proveer un medio de control de los escurrimientos normales y extremos hasta desalojar con seguridad la tormenta de diseño de la presa.

**ANEXO I. Método constructivo “aguas arriba”  
con espigas del depósito actual.**



### Método "aguas arriba" con espigas

Los jales son depositados hacia el vaso de almacenamiento, para ello se emplean espigas (tubos de descarga libre), lo que permite que las partículas más gruesas se depositen primero seguidas por partículas de menor tamaño, y al último el material fino. La separación de estos materiales depende la densidad y de la granulometría del jal. La descarga con espigas permite una separación natural de los jales, aumentando la estabilidad del depósito, ya que el material más grueso se deposita en las zonas exteriores favoreciendo la filtración. El material depositado en las zonas exteriores es más permeable, mientras que en las zonas internas es más impermeable lo que da por resultado una zona saturada lo que produce un manto freático más bajo que en el caso de un depósito para jales homogéneos(figura Al.1).

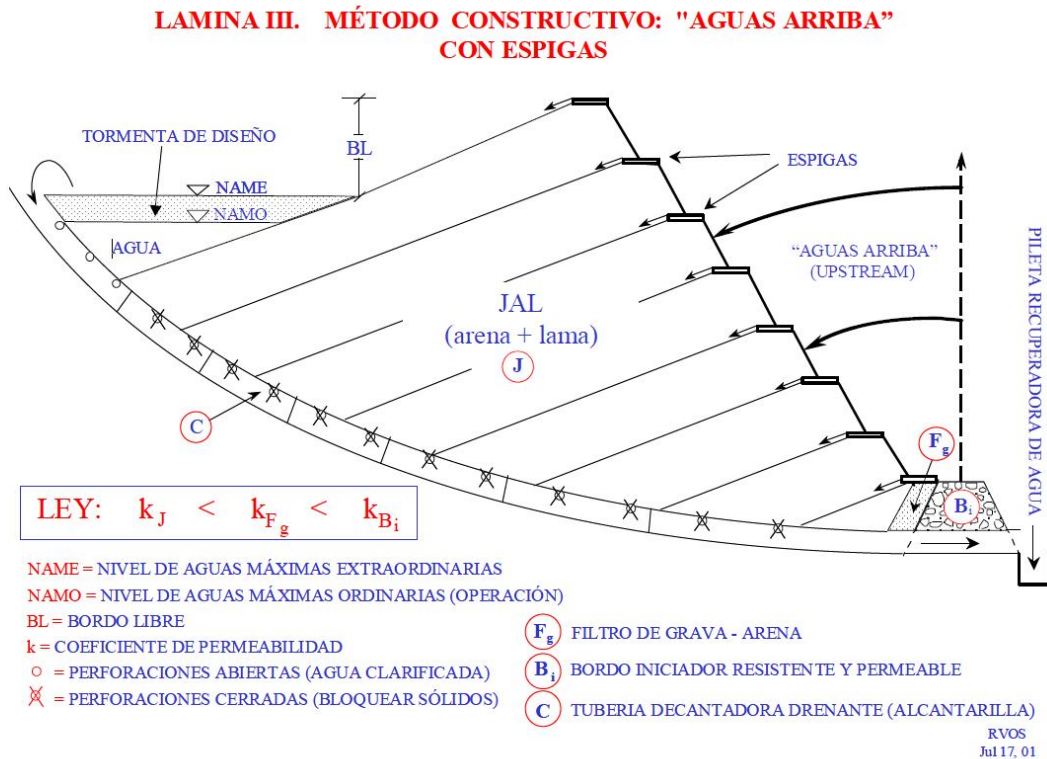


Figura Al.1 Método "aguas arriba" con espigas, NOM-141-SEMARNAT 2003.

## **ANEXO II. Método constructivo “aguas arriba” con jal prensado y compactado.**

## Método “aguas arriba” con jal prensado y compactado

En este método de construcción se parte de un bordo inicial – construido con material obtenido generalmente de banco de préstamo. Este método consiste en ir formando la cortina contenedora a partir del vaso de almacenamiento hacia afuera, mediante jal prensado y compactado. La cortina contenedora va del bordo iniciador hacia arriba y hacia afuera hasta topar con el bordo terminal del bordo iniciador. Los jales pasarán por las prensas filtro y posteriormente serán colocados y compactados hasta alcanzar los valores de contenido de agua y peso volumétrico obtenidos de los resultados de laboratorio. La colocación del jal será en capas de 30 cm, deberá ser colocada con pendiente del 2 % respecto a la entrada de la galería que se encuentre en ese momento. Para llevar un control en cuanto a la compactación del jal se realizarán calas volumétricas por cada 1000 m<sup>3</sup> compactadas, la distribución de estos será la indicada por supervisión.

A continuación se describe brevemente el procedimiento constructivo referente a la ampliación del depósito de jales en estudio.

### 1. Especificaciones generales de construcción de la ampliación

La construcción de la ampliación (ver figura AI-1.1), se construirá siguiendo los lineamientos generales que se mencionan a continuación:

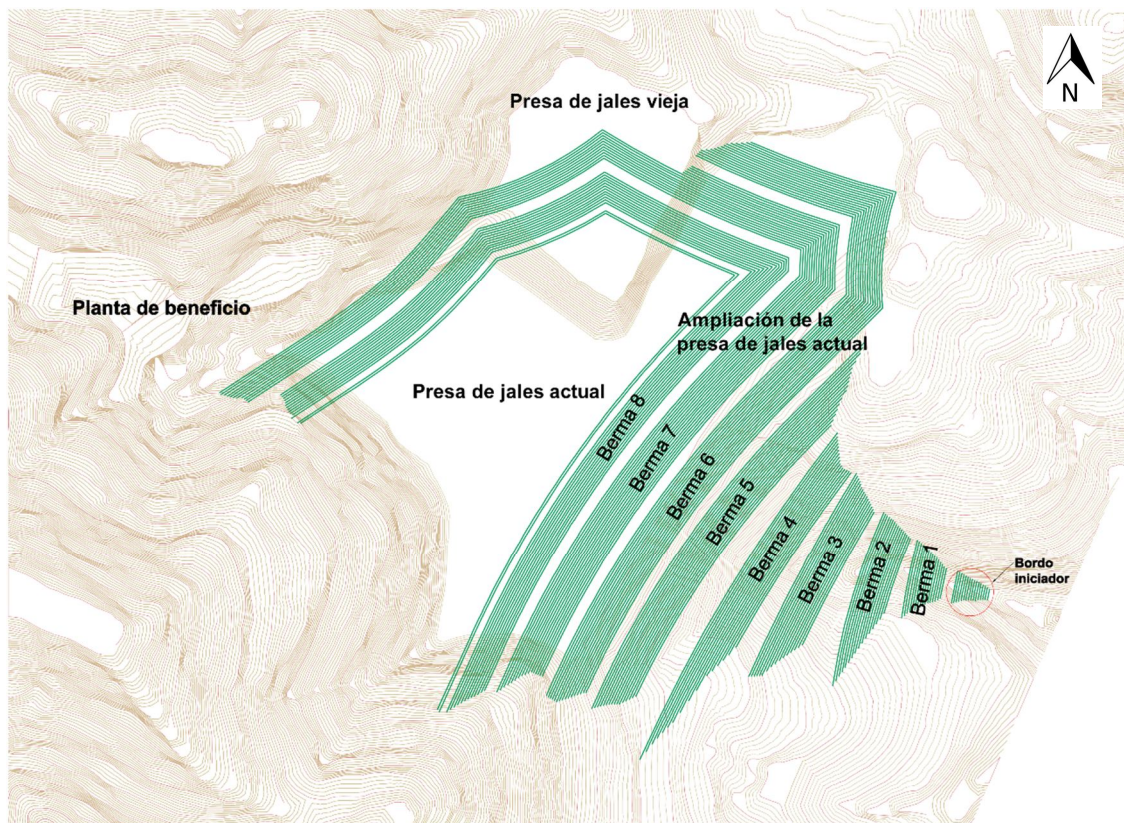


Figura AI.1.1 Localización en planta de la ampliación de la presa actual.

## 1.1 Bordo iniciador

1. Se realizará el desmonte del área en estudio.
2. En las zonas en que se requiera, se ejecutará el desenraice, se sacarán troncos o tocones y raíces, éstos serán removidos hasta una profundidad no menor a 60 cm.
3. Se realizara una excavación para retirar la roca intemperizada en la zona en la que se desplantará el bordo iniciador.
4. Se extenderá el material que conformará la primera capa.
5. Se retirarán todas aquellas partículas mayores a 10 cm.
6. Se agregará el agua necesaria para que el material alcance la humedad óptima.
7. Se compactará al 98% de su PVSM, en prueba Proctor estándar (rama seca).

Los puntos 5 a 9 se repetirán hasta alcanzar la cota 1490 m.s.n.m. (ver figura All.1.1.1).

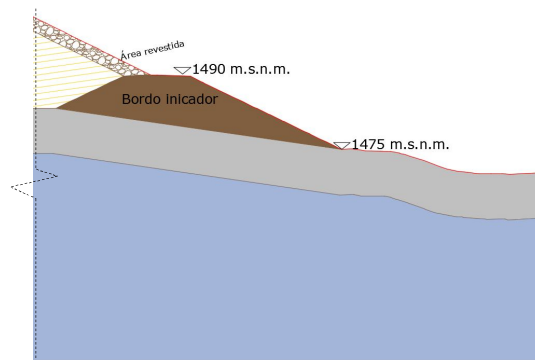


Figura All.1.1.1 Bordo Iniciador en su etapa final.

### Notas:

- Antes de iniciar la construcción del bordo, se deben revisar los planos de la galería (Flopac, 2015a).
- El espesor de las capas serán de 30 cm, excepto:
  - La primera capa se formará con un espesor de 15 cm, con el fin de mejorar la liga con la superficie de desplante.
  - La corona del terraplén se conformará con dos capas, cada una de 15 cm de espesor compactadas al 98% de su PVSM, Proctor estándar.

**Recomendaciones:**

- No debe iniciarse la construcción de terraplenes antes de terminarse los sistemas de drenaje que se ubican en el basamento.
- La compactación de las capas siempre se efectuará de fuera hacia el centro del terraplén, con pasadas paralelas traslapadas en por lo menos la mitad del ancho de la unidad compactadora.
- Toda la superficie deberá recibir el número suficiente de pasadas completas para obtener una compactación uniforme en todo el ancho del terraplén.
- Al terminar cada jornada, la superficie del terraplén deberá estar compactada, nivelada, y con declive suficiente que permita el escurrimiento de agua de lluvia.
- Para llevar un control de calidad se recomienda efectuar las pruebas mostradas en la tabla All.1.1.1, con la frecuencia indicada.

Tabla All.1.1.1 Frecuencia mínima de ensayos para control de calidad (m<sup>3</sup>/ensaye).

Contenido de agua m <sup>3</sup>	Peso volumétrico m <sup>3</sup>
1000	1000

- Una vez construido el terraplén se realizará el acabado geométrico del mismo, perfilando los taludes; además, se hará una última pasada con la compactadora, sin aplicar vibración, con el fin de corregir posibles irregularidades producidas por el paso de la maquinaria y sellar la superficie.
- Se recomienda colocar vegetación en los taludes, con el fin de aumentar su estabilidad, favorecer su integración ambiental y evitar la erosión eólica y pluvial.
- El material destinado para la construcción de bordo iniciador debe de cumplir con la granulometría indicada en la figura All.1.1.2 , además los siguientes requerimientos (MOC, 2003):
  - Su límite líquido ( $w_L$ ) estará entre 35 y 65% y su índice plástico (IP) no deberá ser menor a  $IP=0.6w_L - 9$ .
  - No ser expansivo.
  - Se recomienda que tenga como mínimo un peso volumétrico seco máximo (PVSM) de 1760 kg/m<sup>3</sup>.



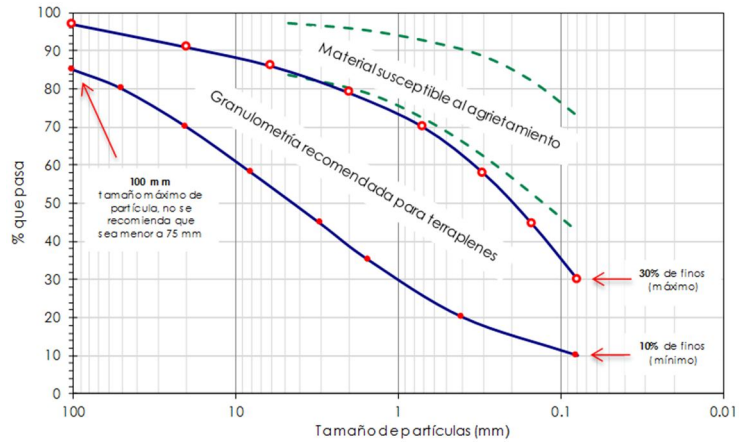


Figura All.1.1.2 Granulometría recomendada para terraplenes (CFE, 1980 y González de Vallejo, 2002).

### 1.2 Colocación de jal

La colocación del jal debe de seguir los siguientes lineamientos generales:

1. De ser necesario se realizará el desmonte y desenraice del área en estudio.
2. El terreno natural se escarificará a una profundidad de 30 cm y se compactará al 98% de su PVSM en pruebas Proctor estándar.
3. Se escarificarán 5 cm para mejorar la liga con la capa siguiente.
4. Se extenderá una capa con espesor máximo de 30 cm.
5. Se debe de buscar una humectación de mínimo 13% y máximo 15%<sup>(1)</sup>.
6. Se compactará con rodillo liso vibratorio o con tractor de orugas, con el suficiente número de pasadas para que el material alcance un peso volumétrico de 2.02 t/m<sup>3</sup>.
7. Los puntos 3 a 6 se repetirán hasta alcanzar la cota 1605 m.s.n.m.

La figura All.1.2.1 muestra la conformación de las capas compactadas.

(1) Ver resultados de pruebas de laboratorio realizadas al jal que se colocará en la ampliación, Flopac, 2015d.

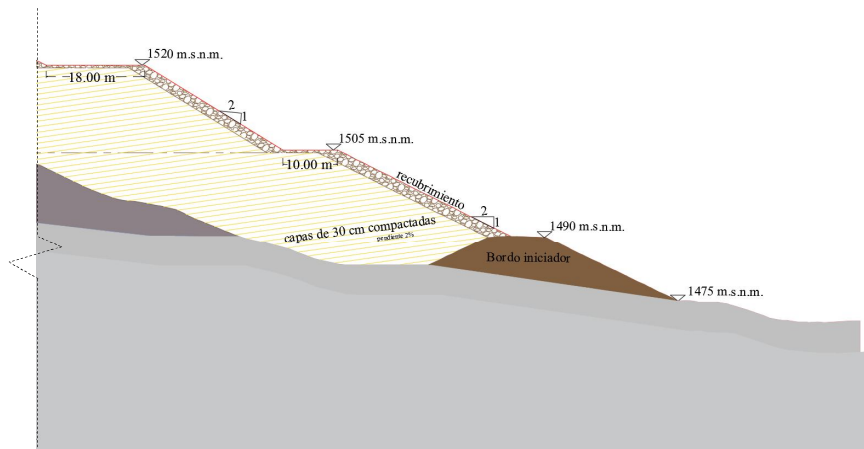


Figura All.1.2.1 Conformación de capas compactadas.

### 1.3 Conformación del talud del jal

Alcanzadas tres capas, se recomienda ir revistiendo el talud con el fin de evitar la erosión del material (ver figura All.1.2.1). Como revestimiento se utilizarán fragmentos de roca con tamaño máximo de 30 cm, el ancho del revestimiento será de 2 m, excepto en el ancho de la berma, en la cual el espesor será de 50 cm.

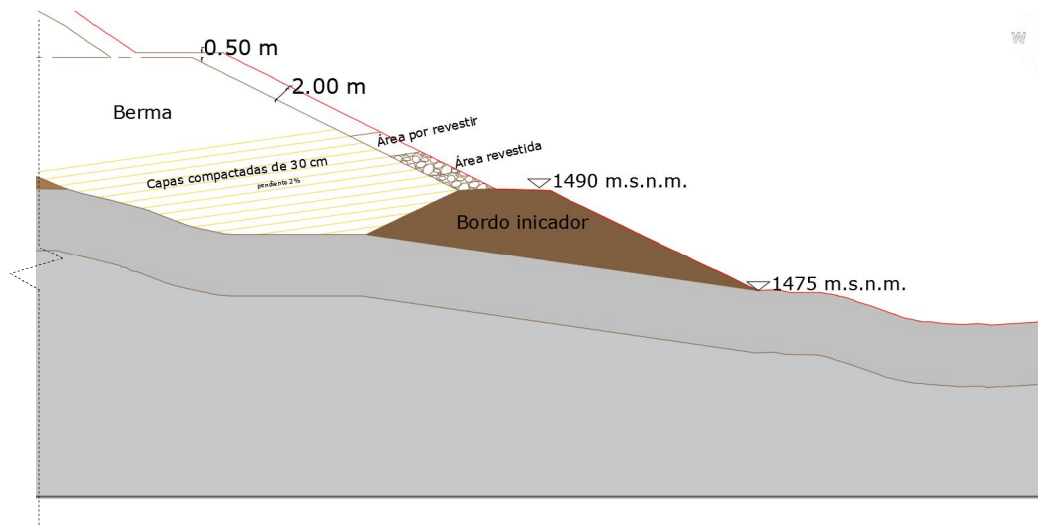


Figura All.1.3.1 Revestimiento del talud.

### 1.4 Bordo libre

Con base en la norma oficial mexicana NOM-141- SEMARNAT-2003, de acuerdo a la zona (seca) en la que se ubica este depósito y considerando la época de lluvias, se debe buscar un bordo libre de 1 m para evitar que haya escurrimientos y arrastre de partículas sobre el talud del depósito (ver figuras All.1.4.1 y All.1.4.2 ).

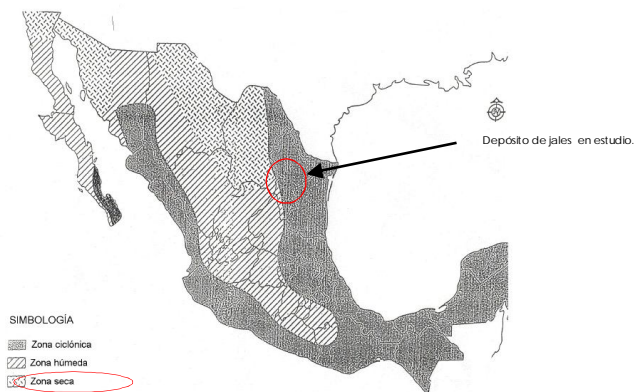
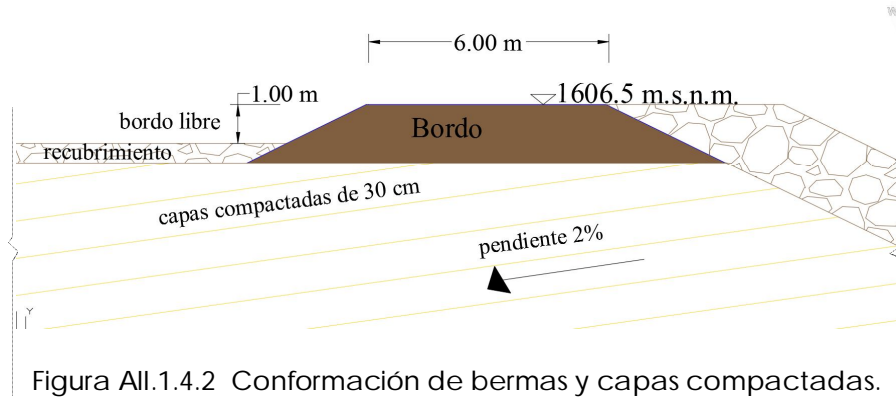


Figura AII.1.4.1 Carta hidrológica de la República (SEMARNAT, 2003).

La construcción del bordo de cierre se llevará acabo de la siguiente manera.

1. Se colocará el material que conformará la primera capa, se retirarán todas aquellas partículas mayores a 10 cm, se agregará el agua necesaria para que el material alcance la humedad óptima y se compactará al 98% de su PVSM.
2. Se escarificarán 5 cm de la capa anterior para mejorar la liga con la capa siguiente.
3. Se extenderá el material que conformará la siguiente capa.
4. Se retirarán todas aquellas partículas mayores a 10 cm.
5. Se agregará el agua necesaria para que el material alcance la humedad óptima.
6. Se compactará al 98% de su PVSM, en prueba Proctor estándar (rama seca).

Los puntos 2 a 6 se repetirán hasta alcanzar la altura de 1606.5 m.s.n.m. (ver figura AI.1.4.2 ).



A medida que se coloquen los jales, se construirá un sistema para desalojo del agua de lluvia, el cual estará compuesto por una torre inclinada y una galería. La ubicación de este sistema decantador será para desalojar el agua pluvial que se almacene en el depósito.

Finalmente para llevar un control adecuado de la estabilidad del depósito, se debe tener constante monitoreo de los pozos de observación instalados, así como una revisión periódica de la instrumentación propuesta.

## **Anexo III. Correlaciones para obtener parámetros mecánicos a partir del número de golpes del ensaye SPT.**



**Correlaciones para obtener parámetros mecánicos a partir del número de golpes de las pruebas SPT y asignación de parámetros volumétricos y mecánicos para el análisis de estabilidad**

A partir de los resultados de los ensayos de SPT se obtuvieron correlaciones que se muestran en esta parte del documento, utilizando ecuaciones obtenidas por varios autores, que relaciona el número de golpes con los parámetros mecánicos del suelo, como el ángulo de fricción interna y la cohesión que se requieren para el análisis de estabilidad de los depósitos.

En la tabla AIII.1 se muestran las correcciones para el número de golpes (N) en función del esfuerzo efectivo de campo, propuestas por cuatro autores: Liao y Whitman (1986), Skempton (1986), Seed et al. (1957) y Peck et al. (1974).

En la figura AIII.1 se muestra gráficamente un nomograma propuesto por Schmertmann en 1985 (Das, B., 2001) en el cual, a partir del esfuerzo efectivo con el número de golpes corregido se estima el ángulo de fricción del suelo.

En la figura AIII.2. se presenta la gráfica de apoyo para obtener la correlación propuesta por Peck, Hanson y Thornburn para obtener el  $\phi$  (Lambe, T., y Withman, R., 2002).

Por su parte Hatanaka (1996) propuso la siguiente correlación para obtener el ángulo de fricción, en función del número de golpes corregido (Ncorr):

$$\phi = \sqrt{(20 \cdot N_{corr})} + 20.$$

Terzaghi y Peck (1948) propusieron la siguiente ecuación para estimar el número de golpes con una corrección para valores de N  $\geq$  15:

$$N = 15 + \frac{1}{2} (N' - 15) = \frac{N' + 15}{2} \tag{8}$$

Tabla AIII.1 Correcciones de N para obtener el ángulo de fricción ( $\phi$ ), método de Hatanaka 1996 (modificado de Das, B., 2001).

Fuente	C <sub>N</sub>
Liao y Whitman (1986)	9.78 [ $\sqrt{1/\sigma'_0}$ ]
Skempton (1986)	2/(1+0.01 $\sigma'_0$ )
Seed et al. (1957)	1-1.25 log ( $\sigma'_0/95.6$ )
Peck et al. (1974)	0.77 log (1912/ $\sigma'_0$ ) Para $\sigma'_0 \geq 25$ kN/m <sup>2</sup>

Corrección para el número de golpes:

$$N_{corr} = C_N \cdot N_F$$

[9]

donde:  $N_{corr}$  = Valor de N corregido a un valor estándar de  $\sigma'_0$  (95.6 kN/m<sup>2</sup>)

$C_N$  = Factor de corrección

$N_F$  = Valor de N obtenido en campo

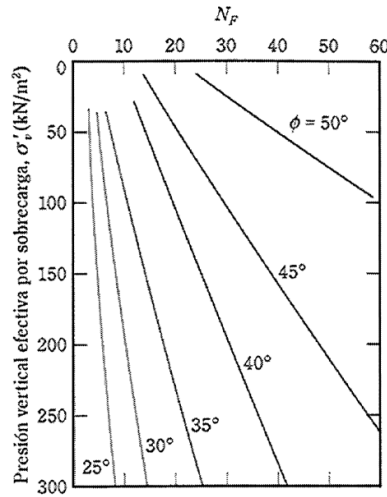


Figura AIII.1. Correlación de Scmertmann (1985) entre  $N_F$  y  $\sigma'_0$  (Das, B., 2001).

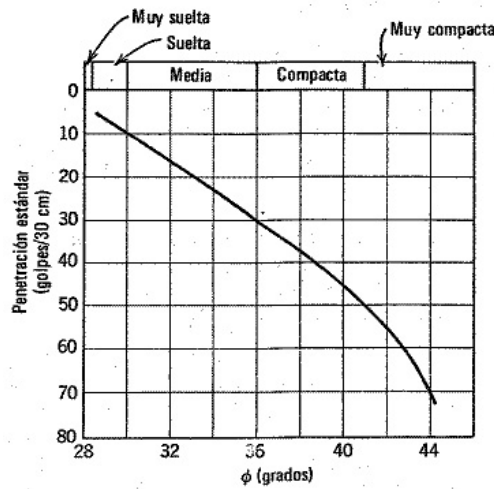


Figura AIII.2. Correlación de Peck, Hanson y Thornburn para obtener el  $\phi$  (Lambe, T., y Withman, R., 2002).

Fórmula de Hatanaka (1996).

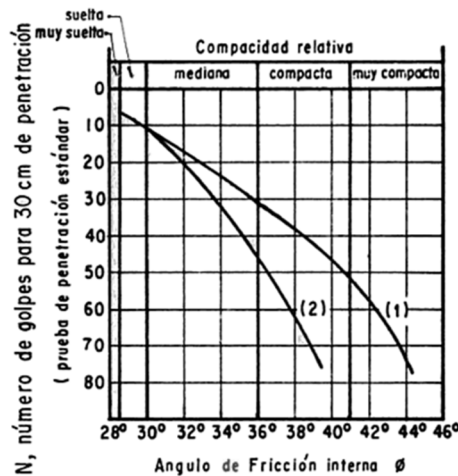
$$\phi = \sqrt{(20 \cdot N_{corr})} + 20$$

[10]

Corrección para el número de golpes para la figura 4.3 (Terzaghi y Peck, 1948), únicamente cuando  $N \geq 15$ .

$$N = 15 + \frac{1}{2}(N' - 15) = \frac{N' + 15}{2}$$

[11]



- (1) Relación para arenas de grano anguloso o redondeado de mediano a grueso.
- (2) Relación para arenas finas y para arenas limosas.

Figura All.3 Correlación entre  $N_{corr}$  y  $\phi$  (tomado de Rico, A., Del Castillo, H., 2003).

Respecto a la cohesión, Stroud (1974), Hara (1971) y Terzaghi y Peck proponen correlaciones con el número de golpes, las cuales se muestran en la tabla Al.2.

Tabla All.2. Correlaciones entre  $N$  y la cohesión del material (Das, B., 2001).

Fuente	$C_u$
Stroud (1974) ( $kN/m^2$ )	$C_u = K * N$
Hara (1971) ( $kN/m^2$ )	$C_u = 29 * N^{0.72}$
Terzaghi y Peck ( $kg/cm^2$ )	$C_u = N/15$

Con las correlaciones anteriores se estimó tanto el ángulo de fricción ( $\phi$ ) como la cohesión ( $c$ ) del suelo, parámetros que se requieren para el análisis de estabilidad de los depósitos. En función del número de golpes corregido se obtuvieron perfiles con las ecuaciones propuestas por los diferentes autores, para los seis sondeos realizados.

Con base en los resultados de campo, laboratorio y gabinete se asignaron los parámetros de resistencia del suelo para cada sondeo, así como pesos específicos determinados en laboratorio en sus condiciones naturales. Esta información sumada a la geometría de la cortina en un eje ortogonal al bordo seleccionado es necesaria para llevar a cabo el análisis de estabilidad.

En las figuras AIII.4 a AIII.9. se muestran los perfiles de  $\phi$  y  $c$  para cada sondeo. Con línea punteada en rojo se define el valor que se le asignó a cada uno de los parámetros para diferentes intervalos de profundidad.

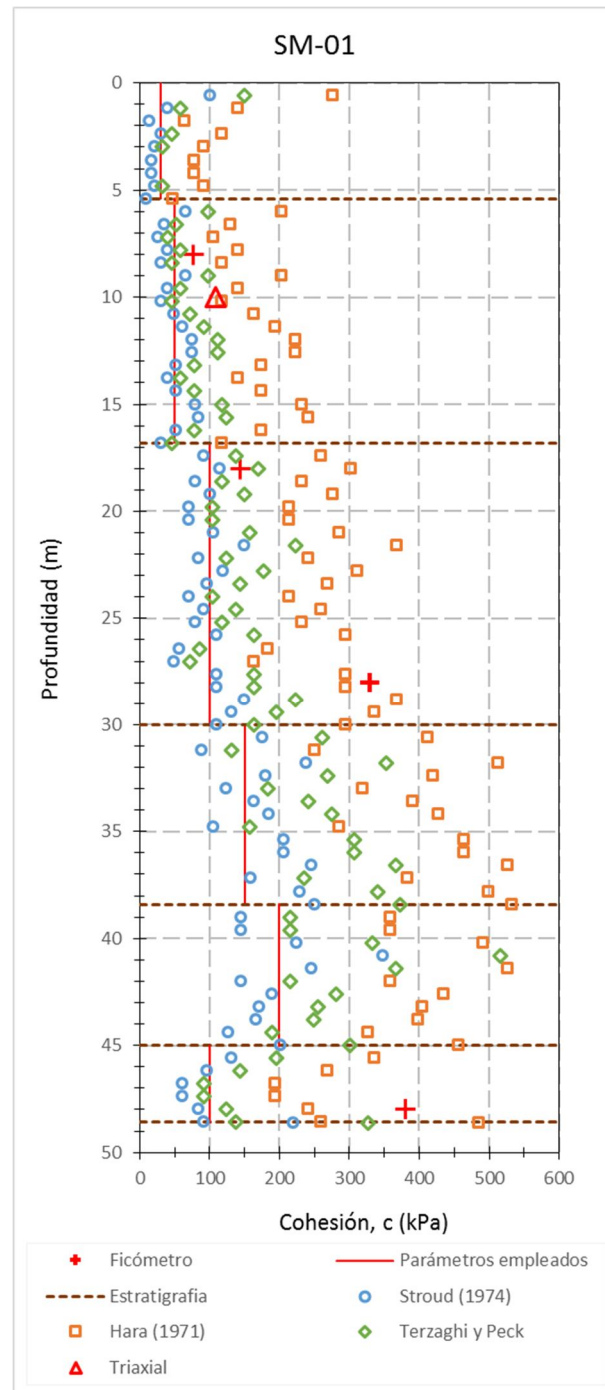
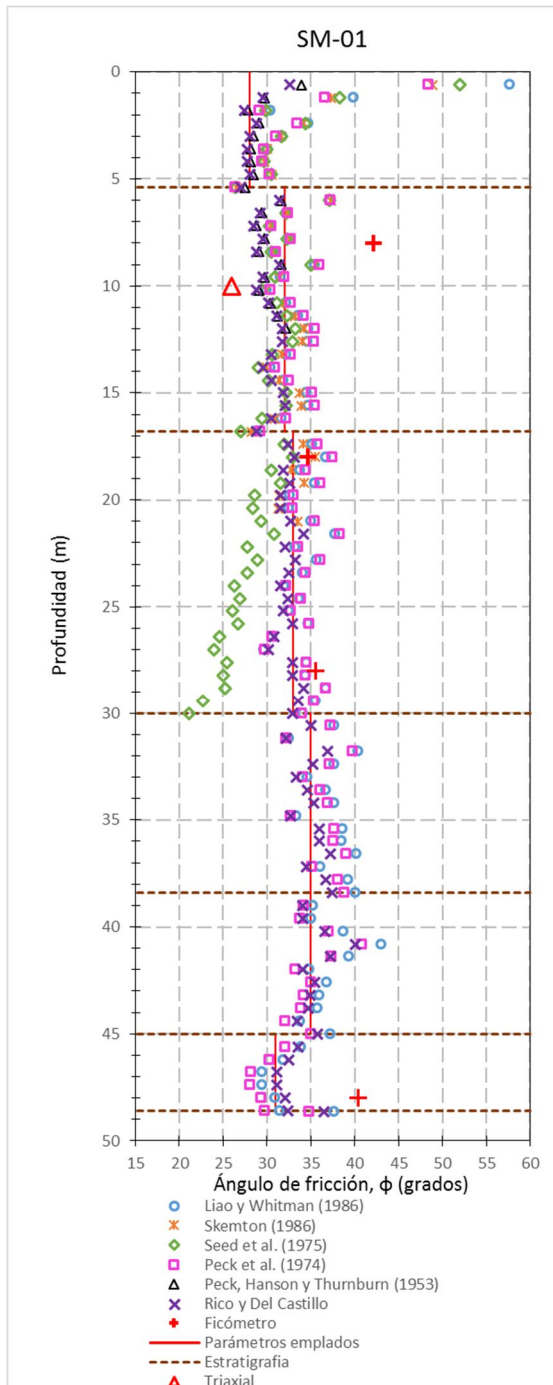


Figura AIII.4 Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-01. Flopac, 2015f.

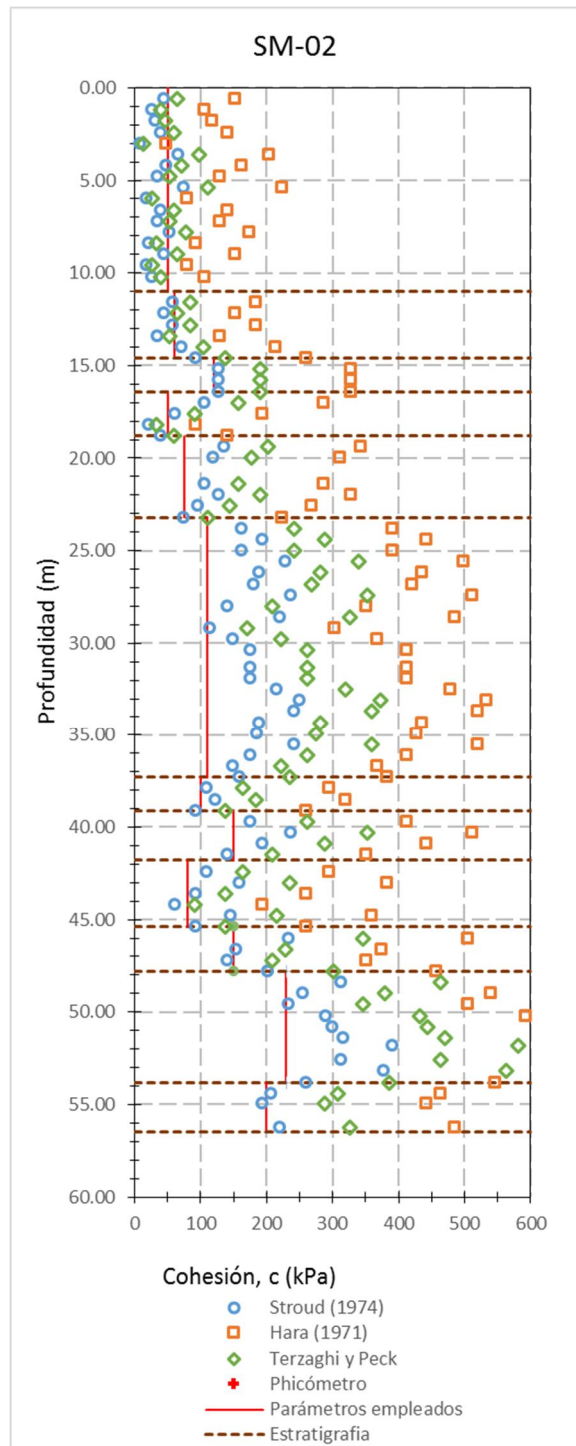
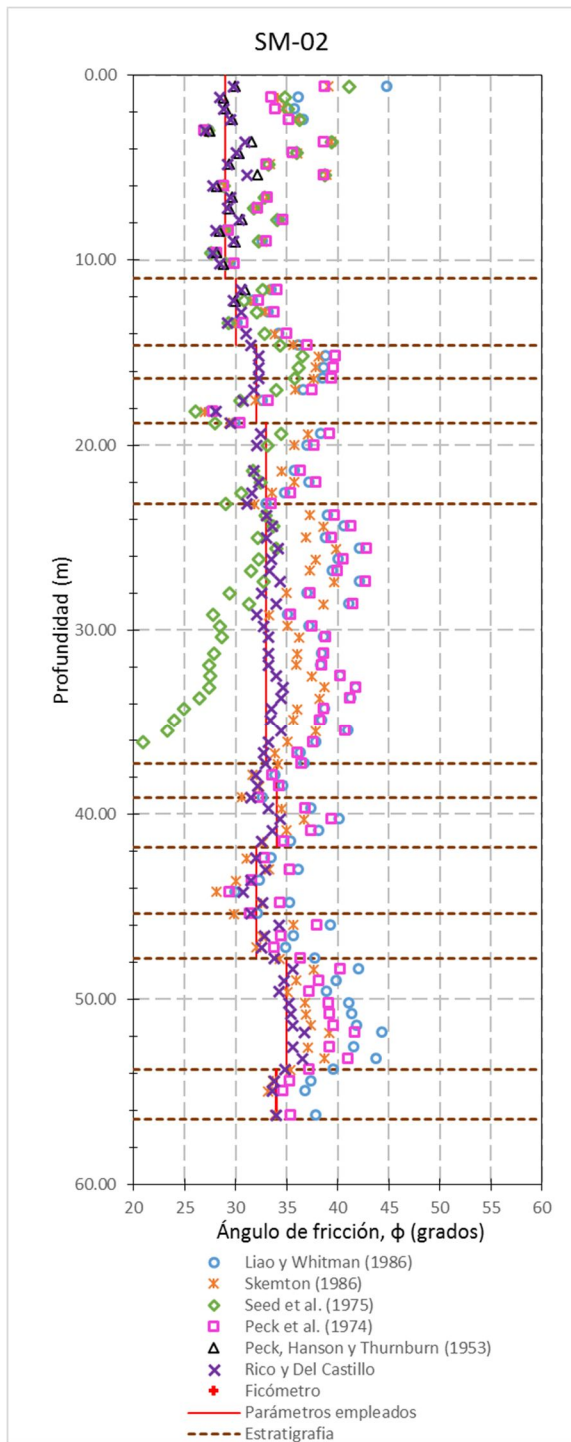


Figura AIII.5 Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-02. Flopac, 2015f.



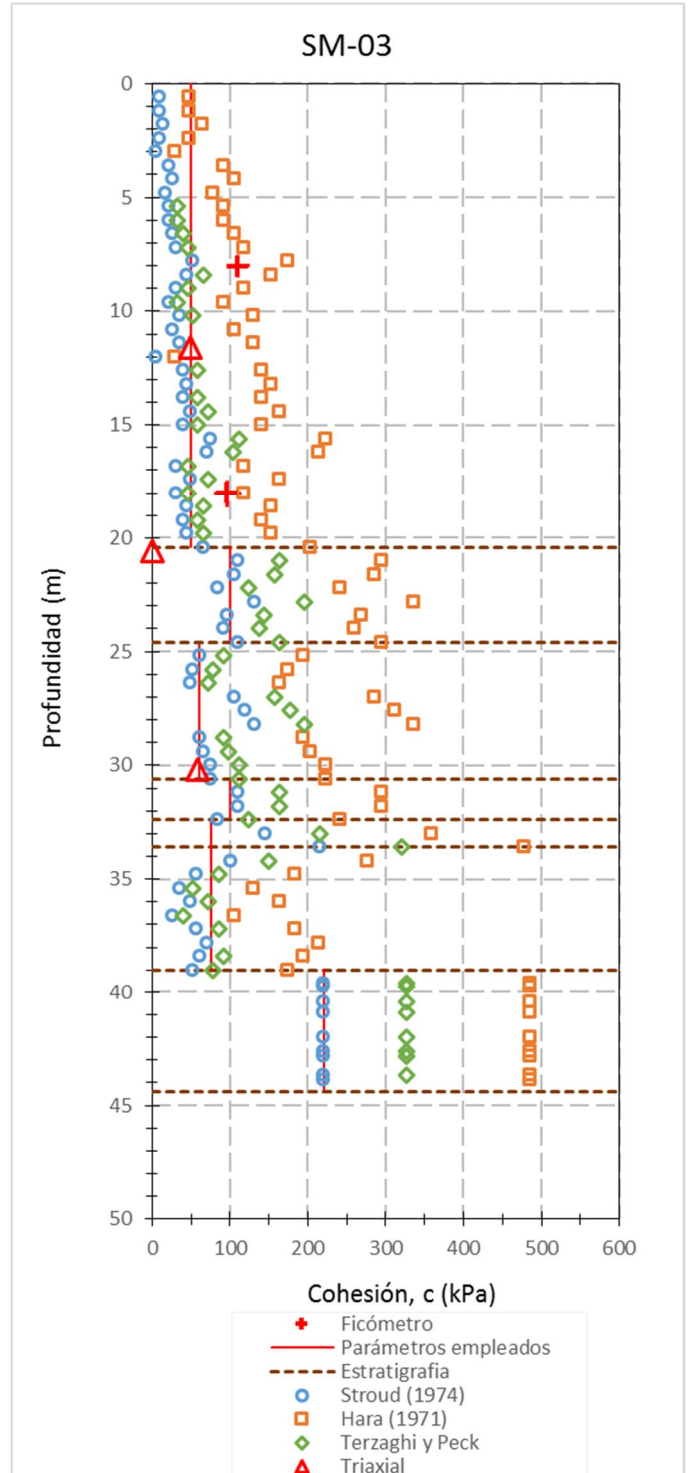
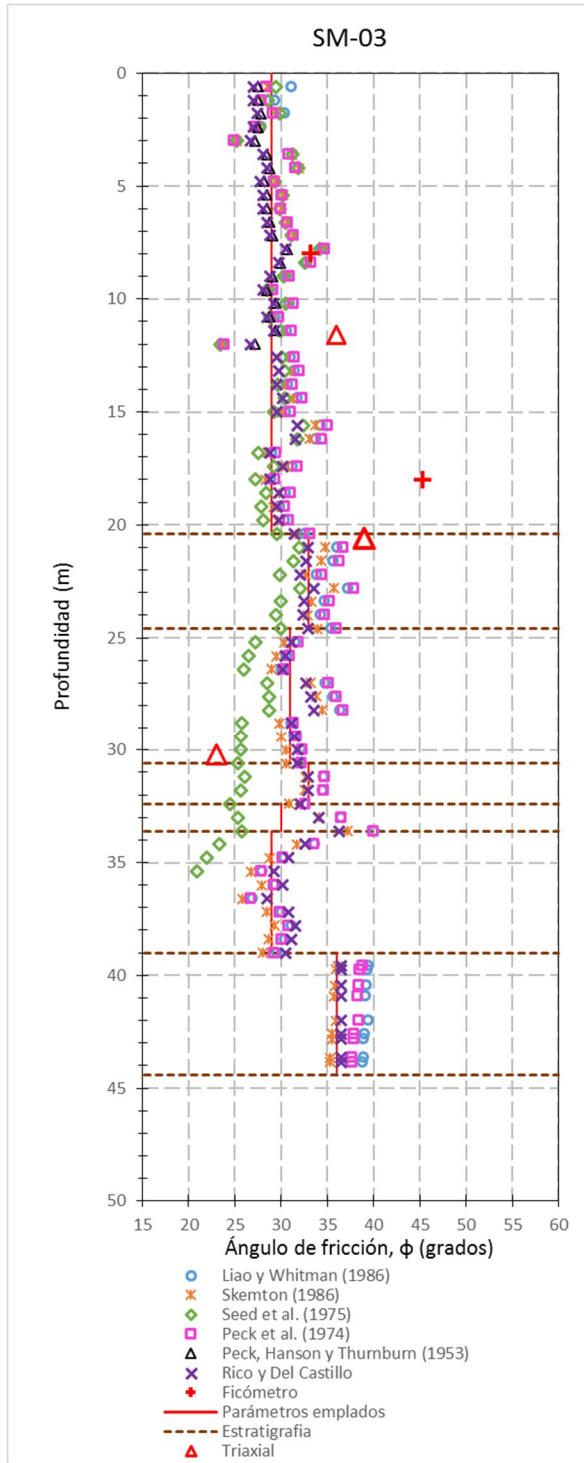


Figura AIII.6 Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-03. Flopac, 2015f.

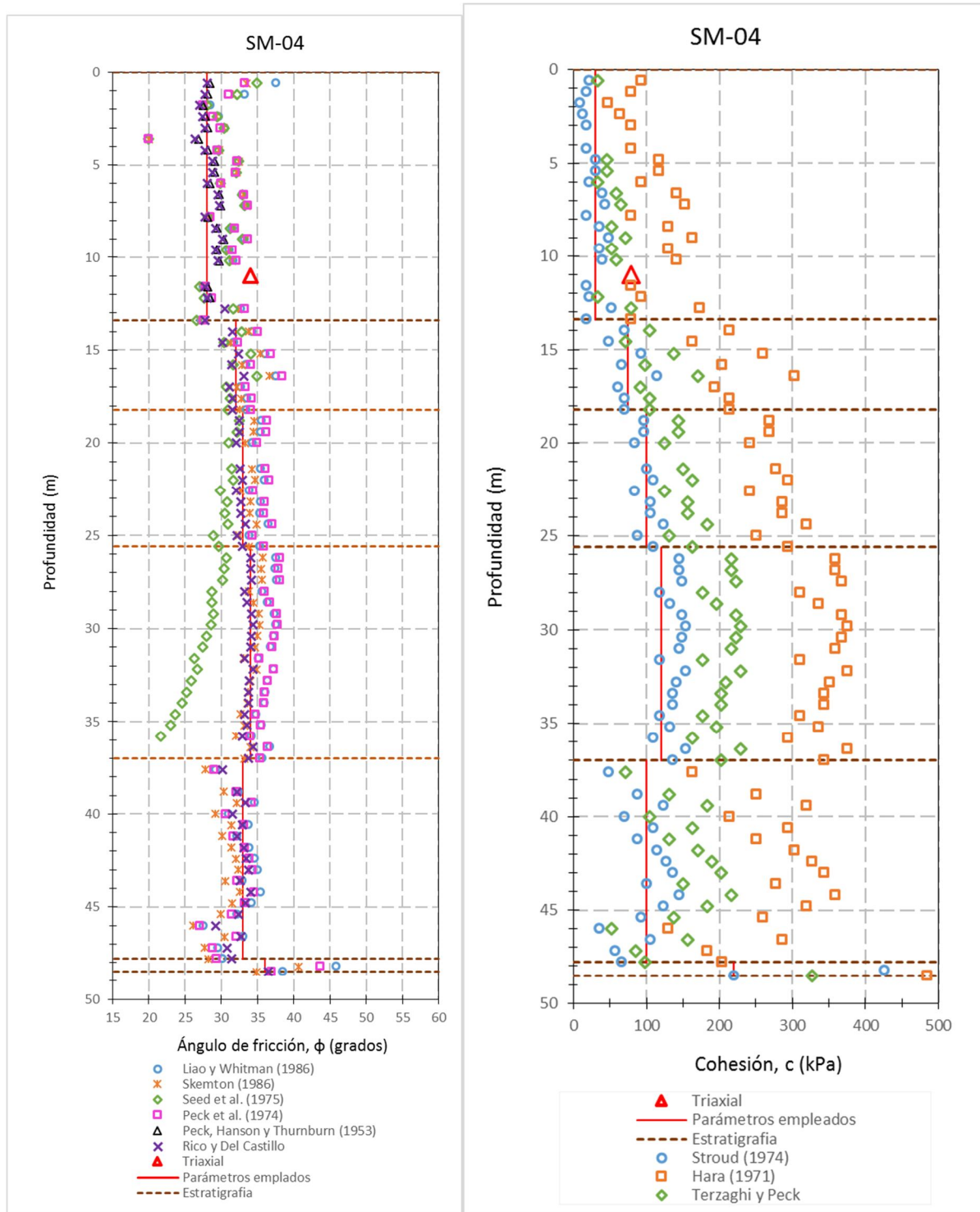


Figura AIII.7 Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-04. Flopac, 2015f.

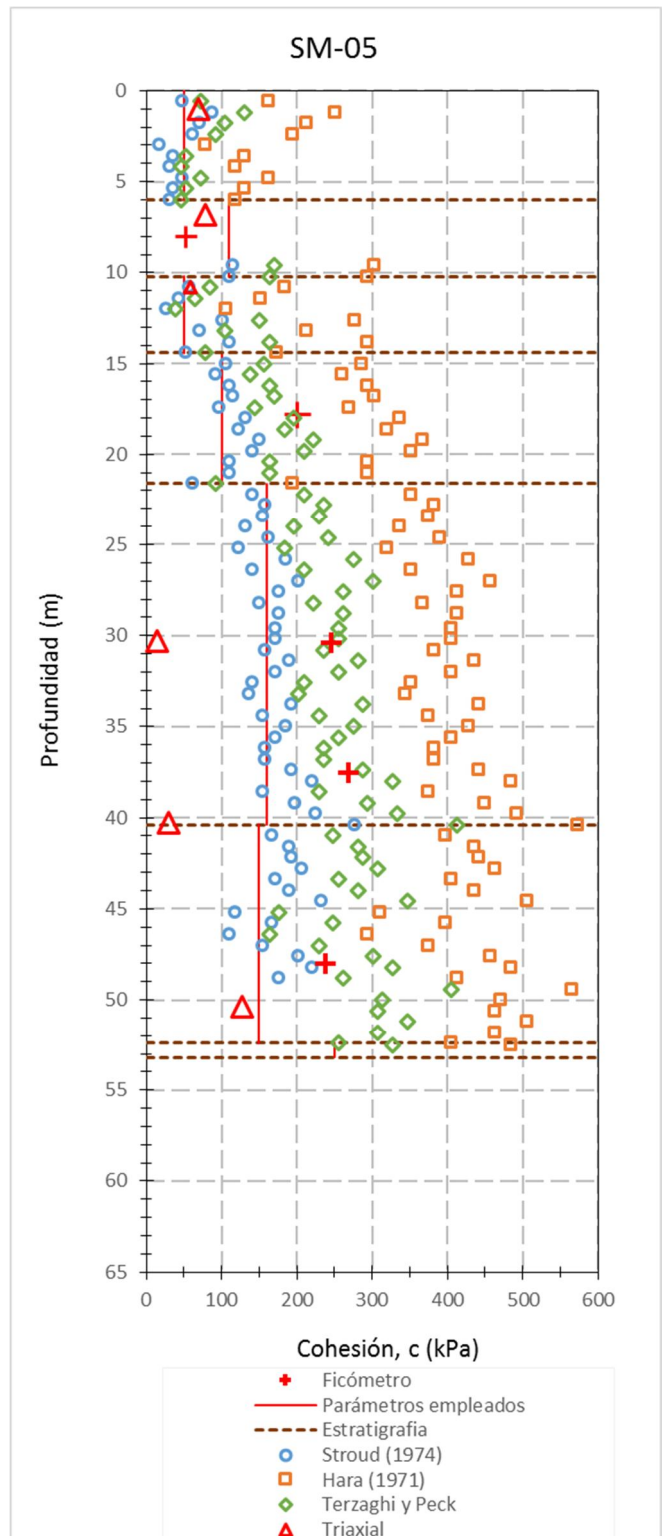
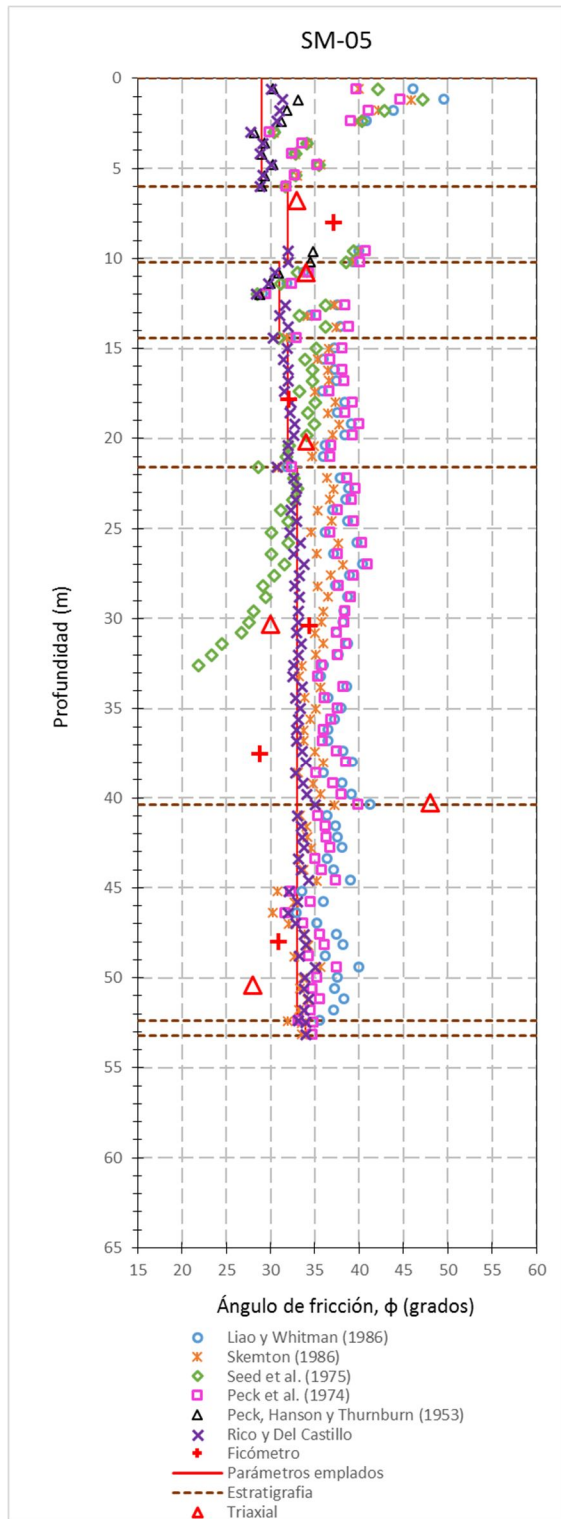


Figura AIII.8 Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-05. Flopac, 2015f.

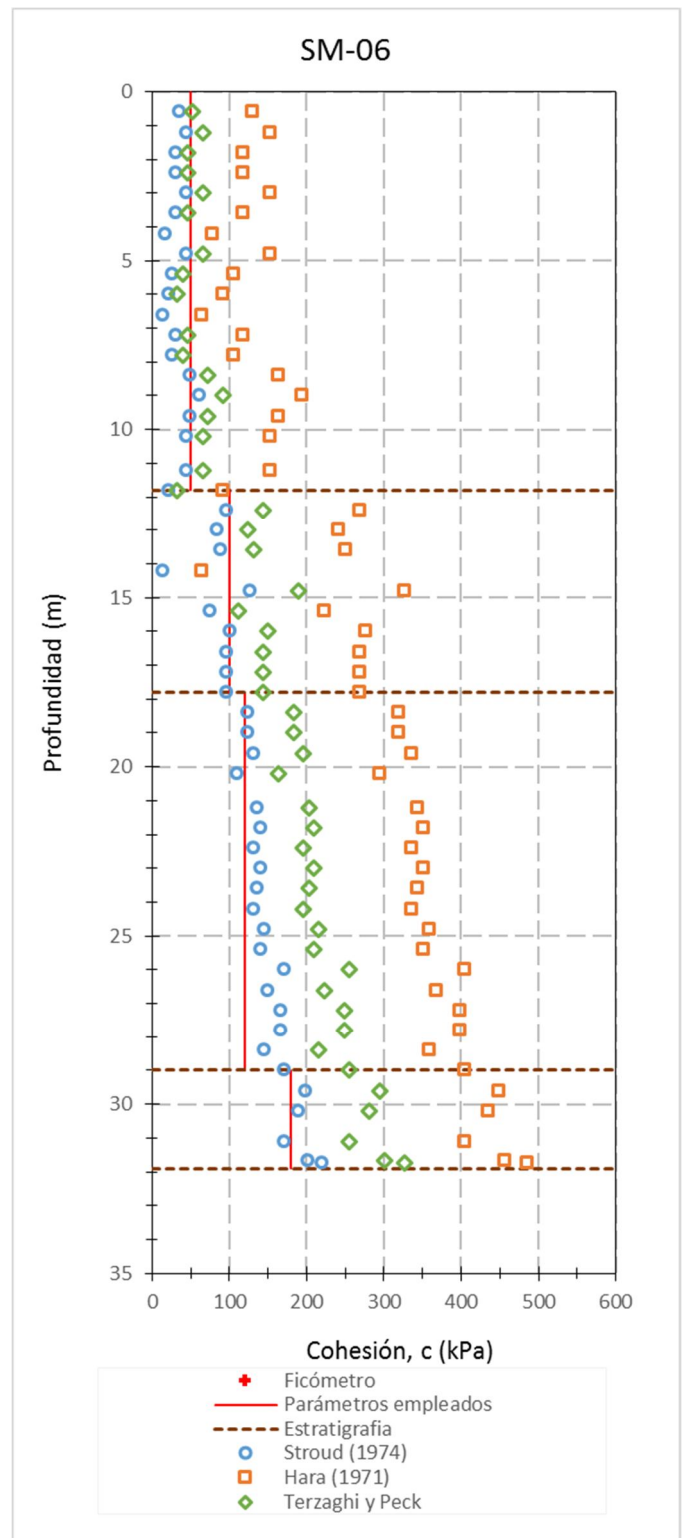
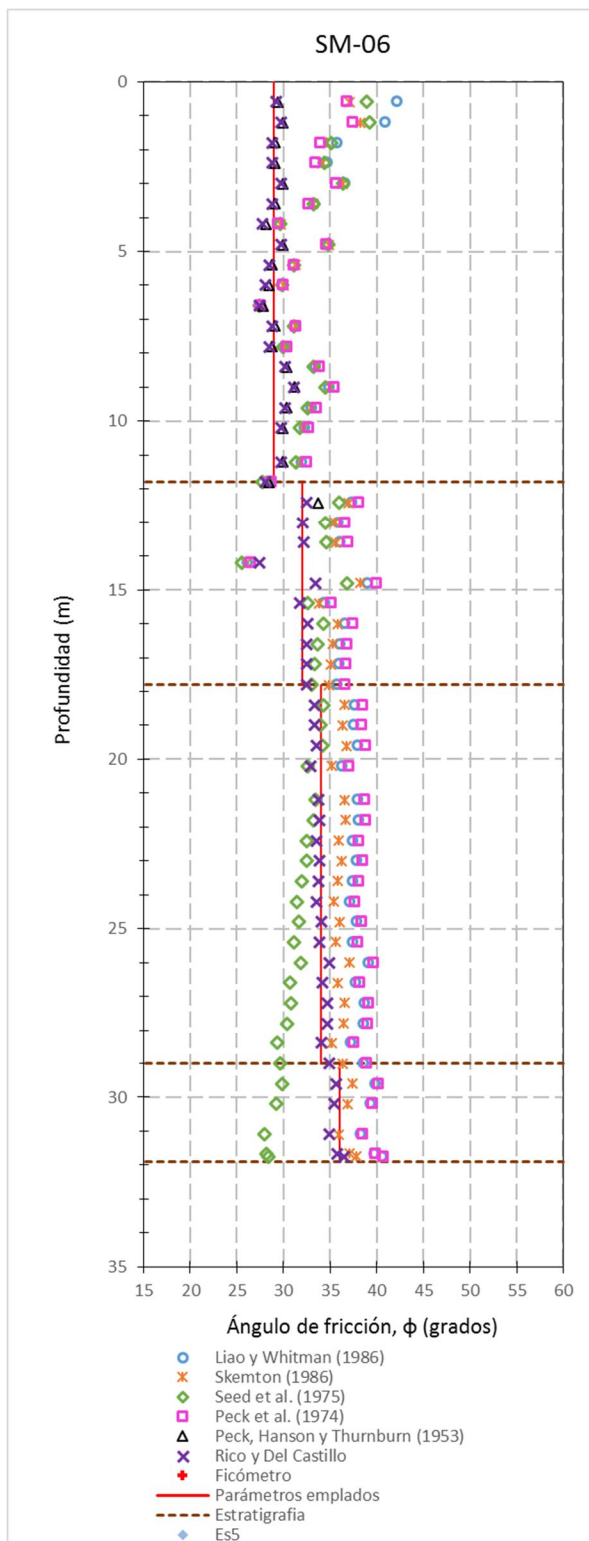


Figura AIII.9 Ángulo de fricción interna y cohesión para el SM-06. Flopac, 2015f.

**ANEXO IV**

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL  
DEPÓSITO ACTUAL,E-01.**

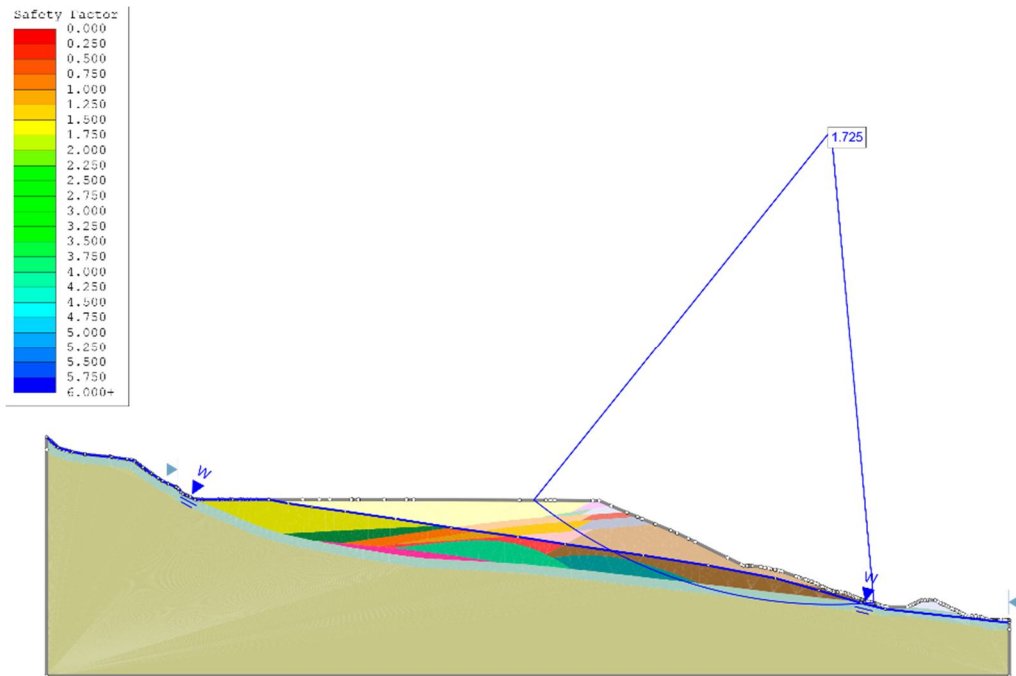


Figura AIV-1 Análisis estático, corte 01 etapa actual (E-01). Flopac, 2015f.

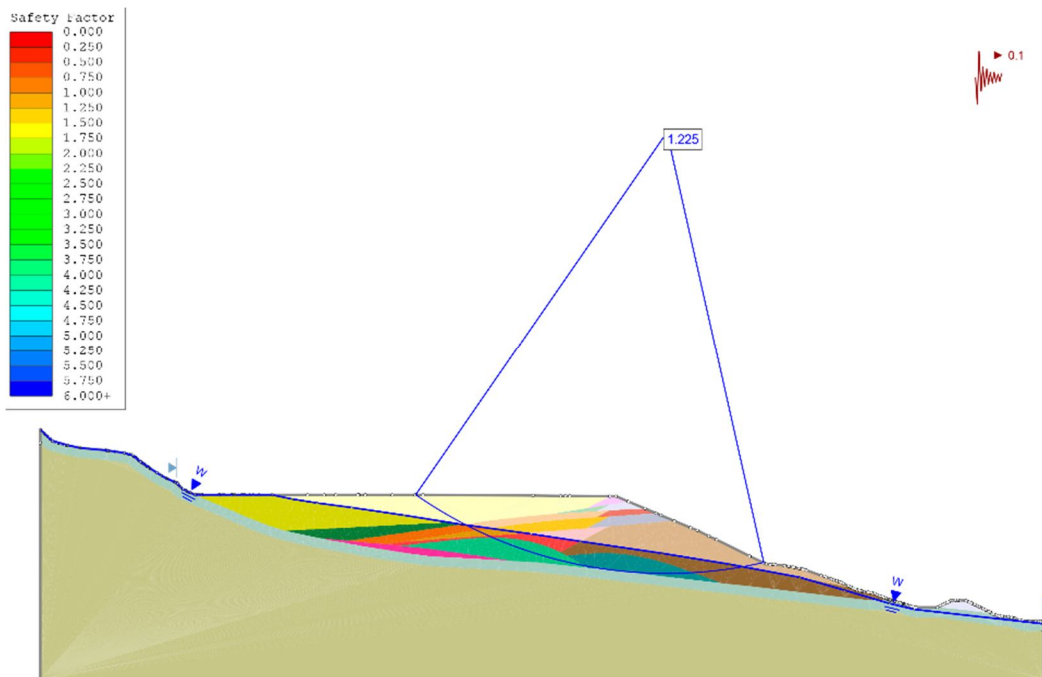


Figura AIV-2 Análisis accidental por sismo, corte 01 etapa actual (E-01). Flopac, 2015f.



**ANEXO V**

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA  
AMPLIACIÓN, ETAPA E-02**

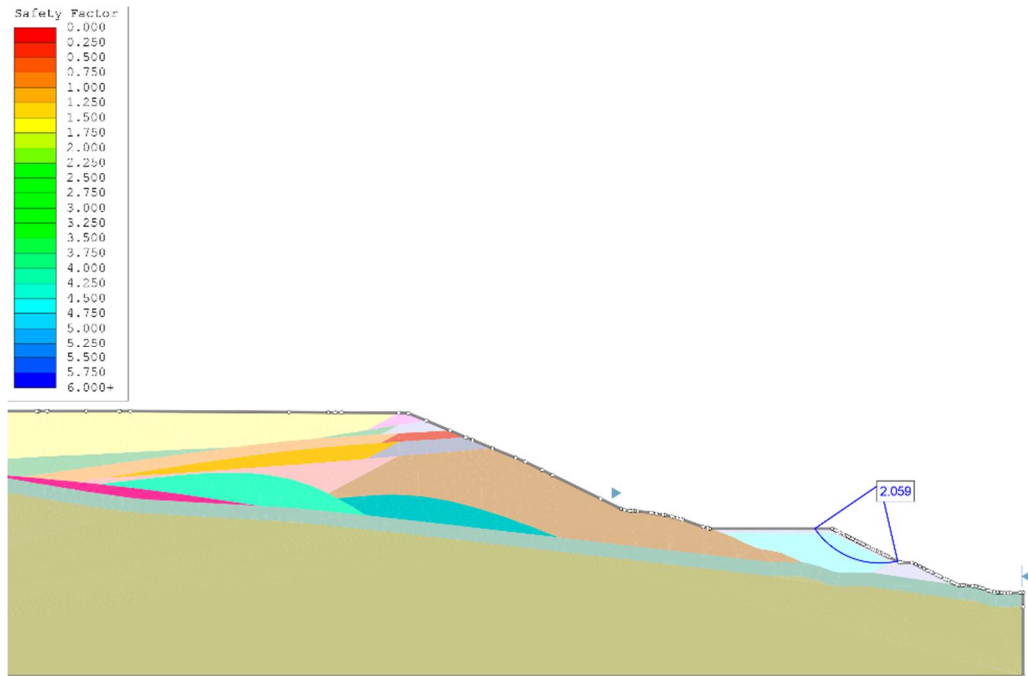


Figura AV-1 Análisis estático, corte 01-berma 1, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

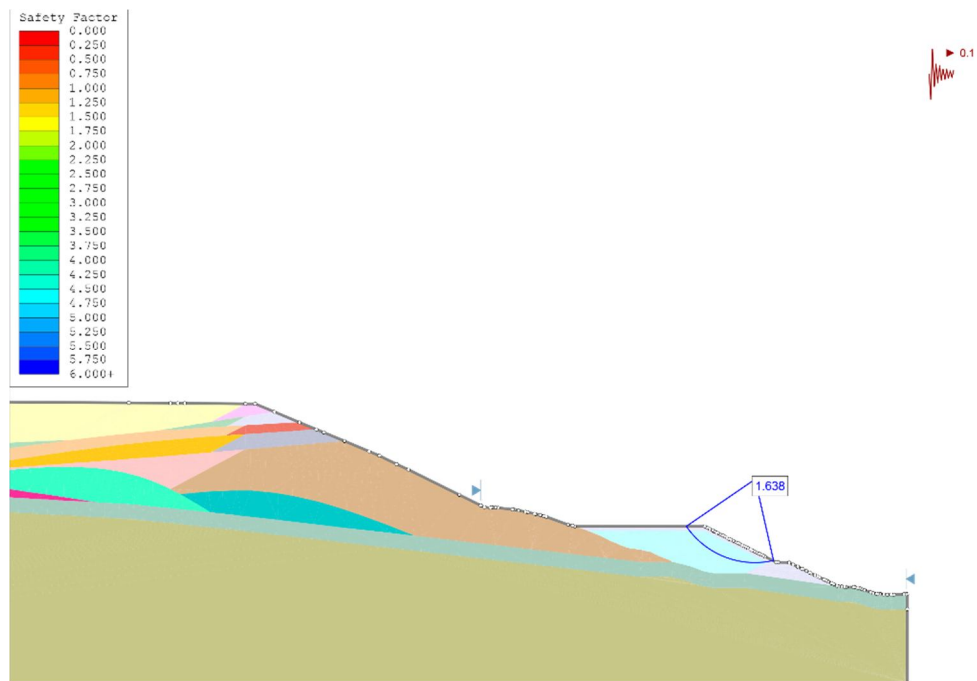


Figura AV-2 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 1, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

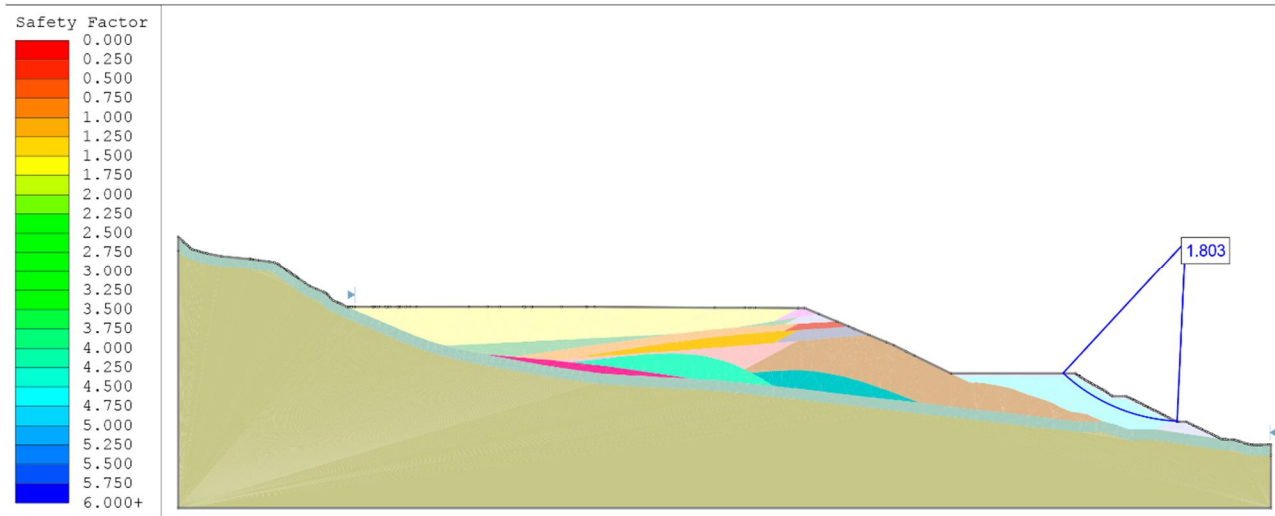


Figura AV-3 Análisis estático, corte 01-berma 2, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

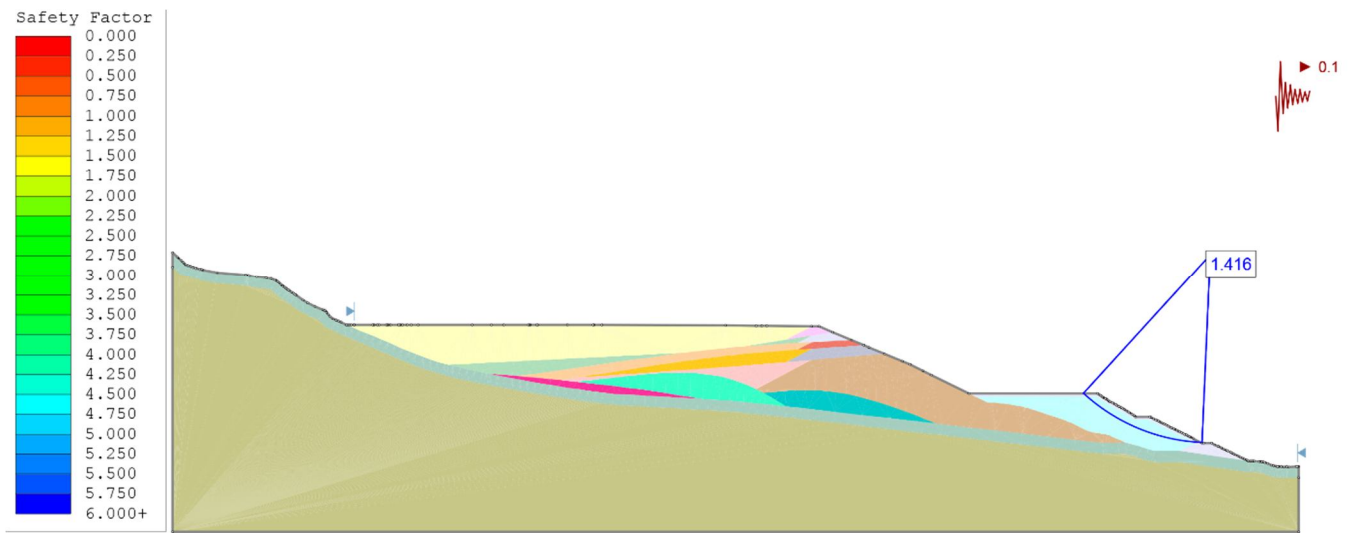


Figura AV-4 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 2, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

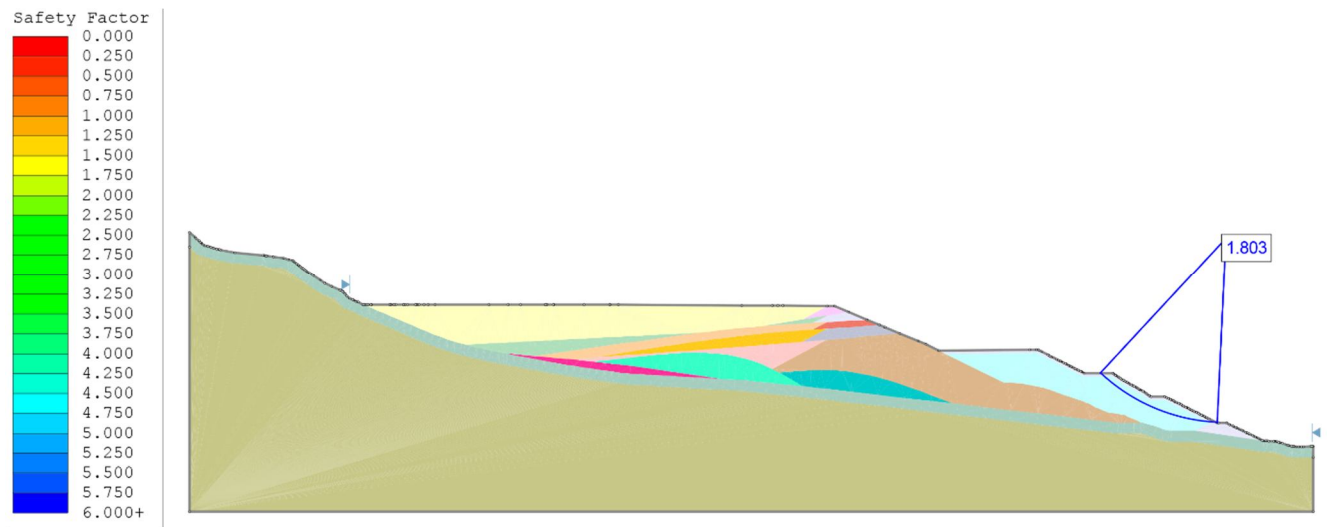


Figura AV-5 Análisis estático, corte 01-berma 3, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

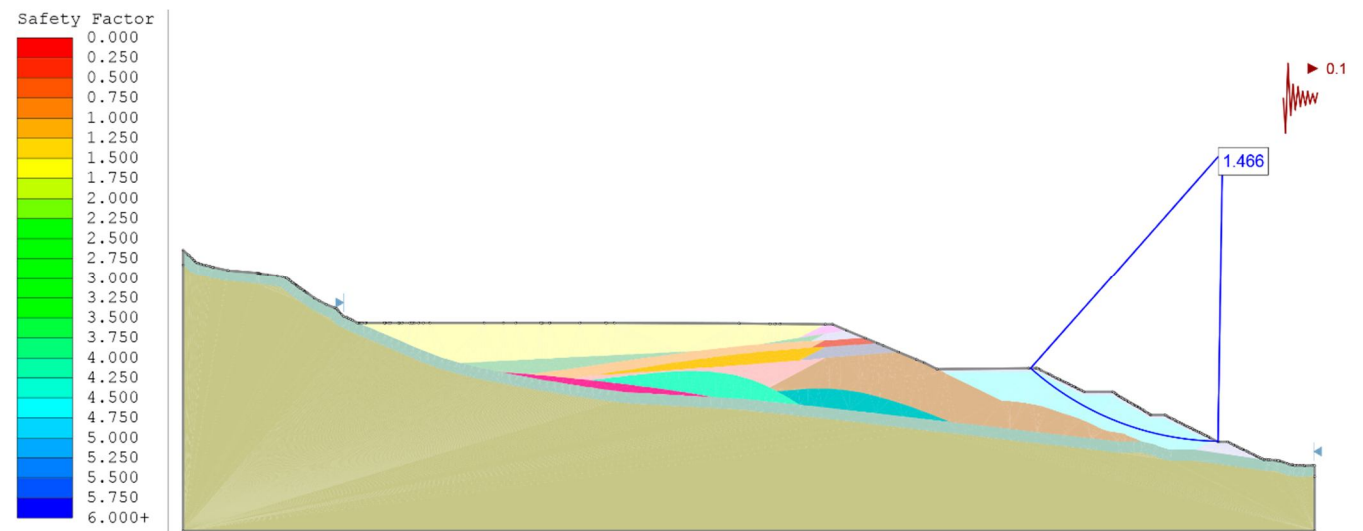


Figura AV-6 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 3, lado norponiete, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

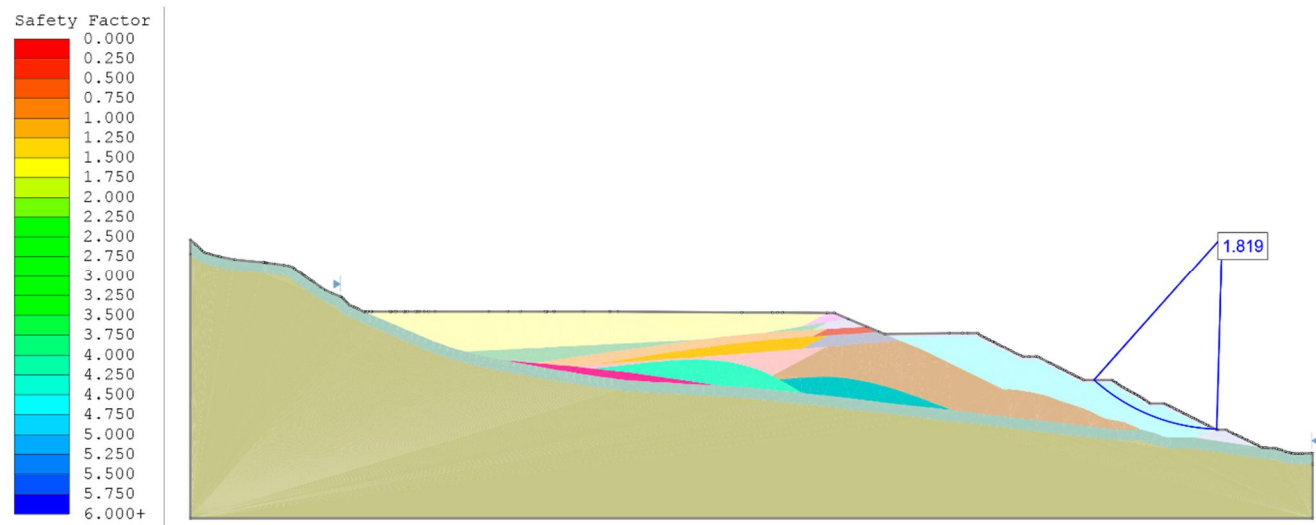


Figura AV-7 Análisis estático, corte 01-berma 4, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

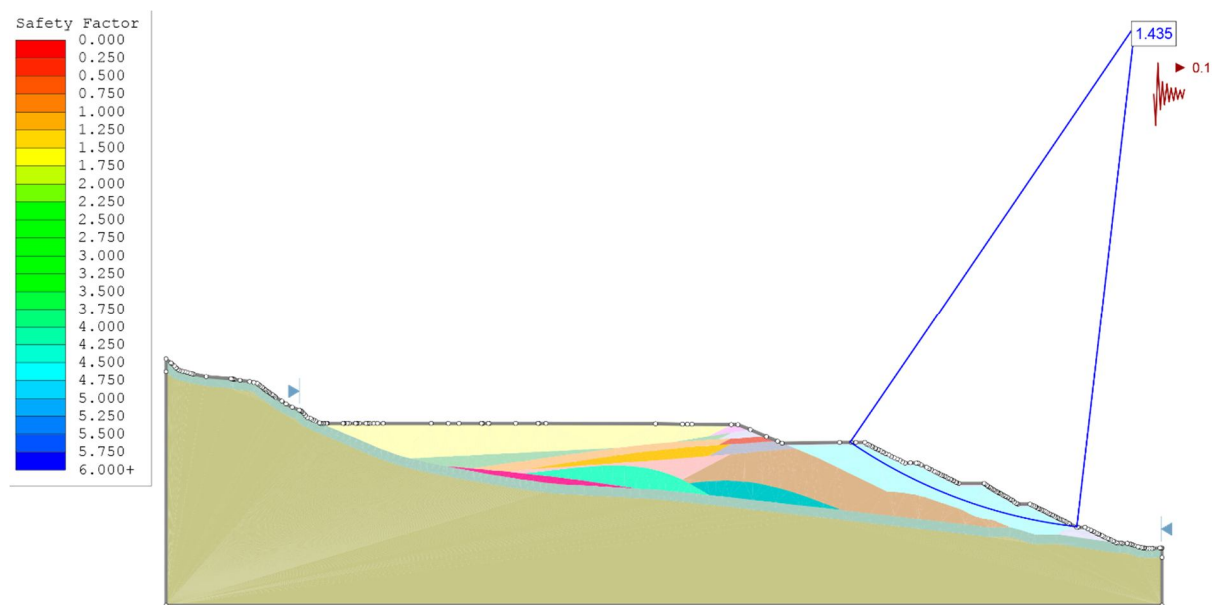


Figura AV-8 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 4, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

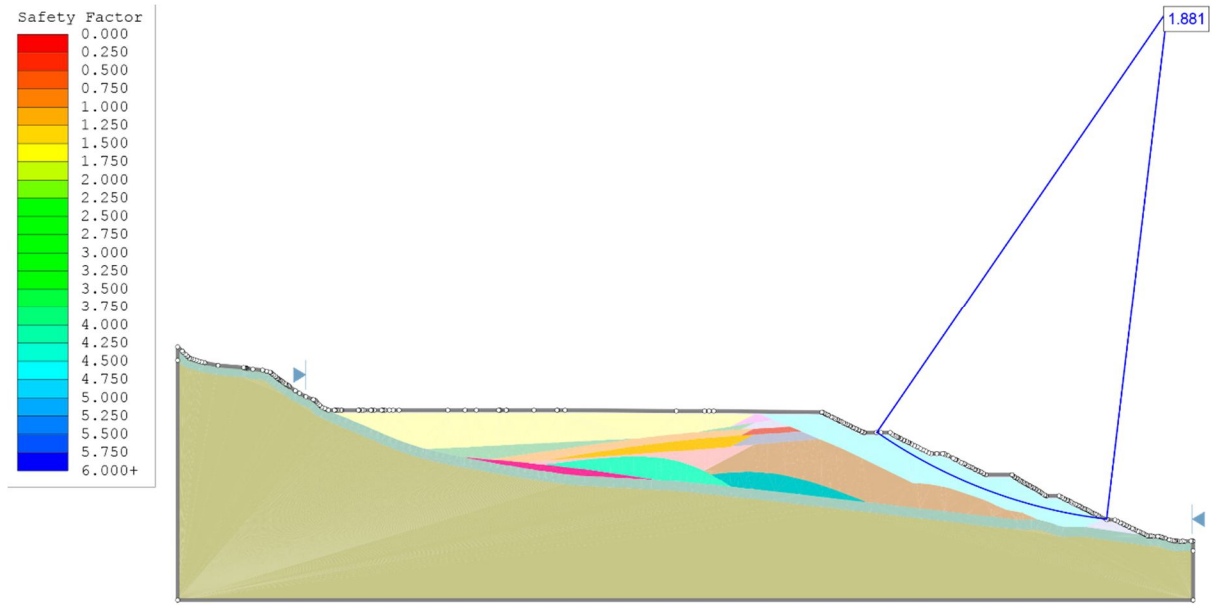


Figura AV-9 Análisis estático, corte 01-berma 5, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

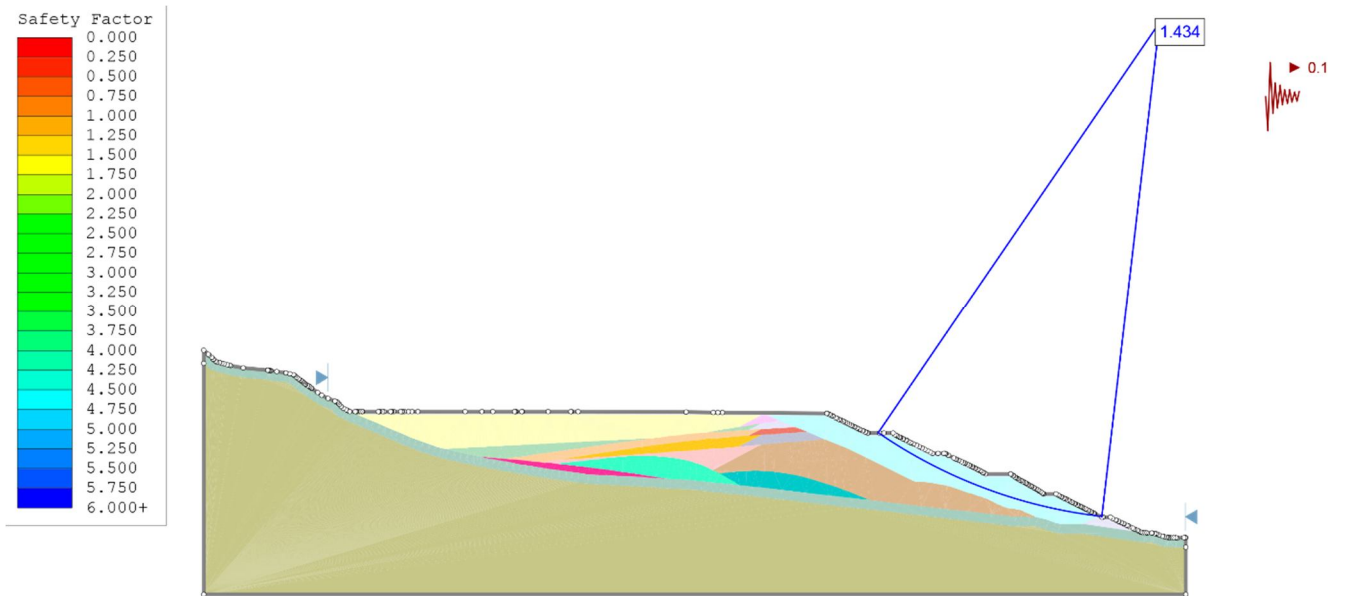


Figura AV-10 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 5, lado norponiente, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.



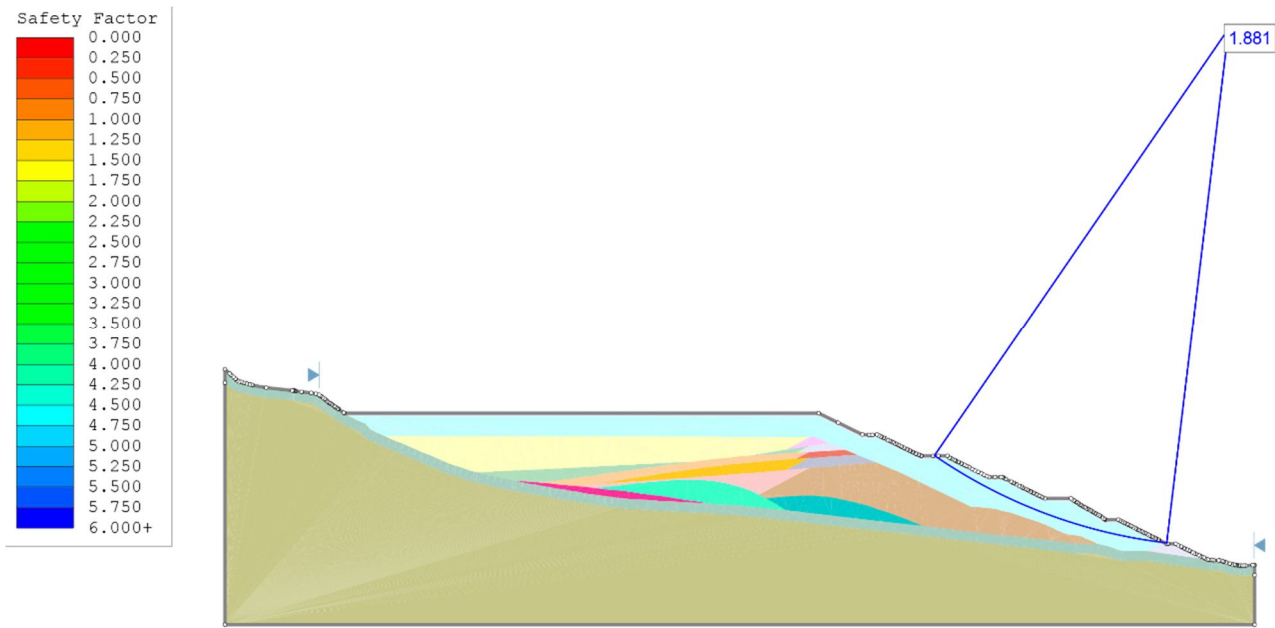


Figura AV-11 Análisis estático, corte 01-berma 6, lado norponiente, etapa 2 (E-02).  
Flopac, 2015f.

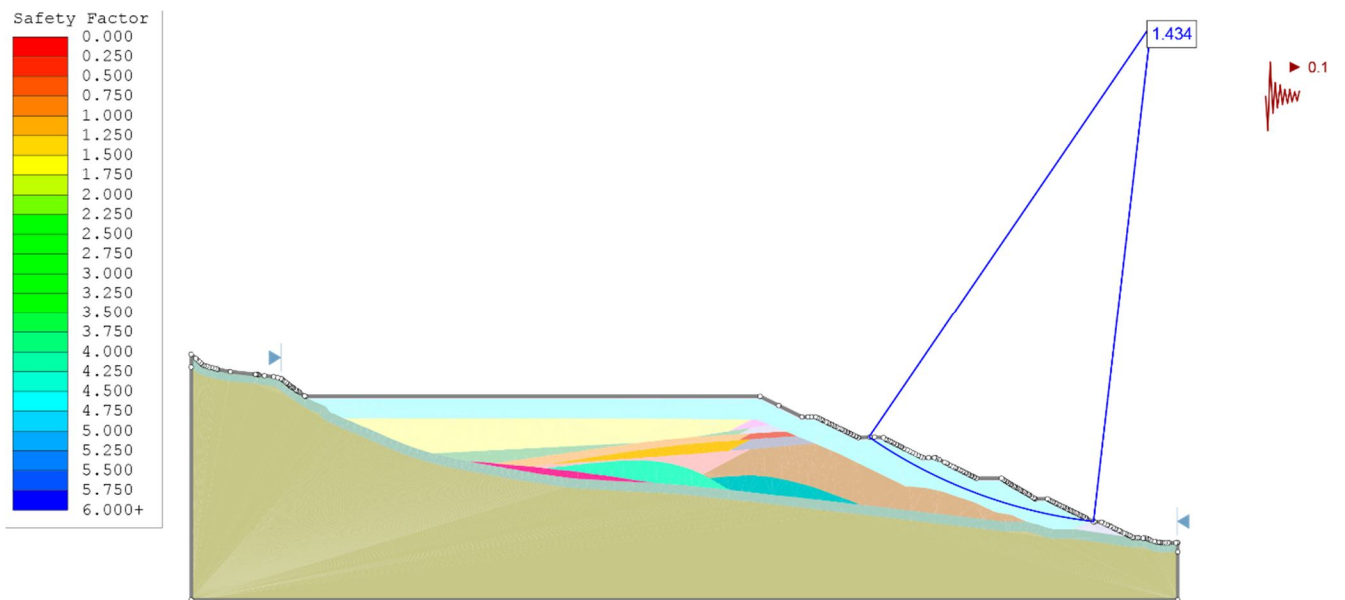


Figura AV-12 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 6, lado norponiente, etapa 2 (E-02).  
Flopac, 2015f.

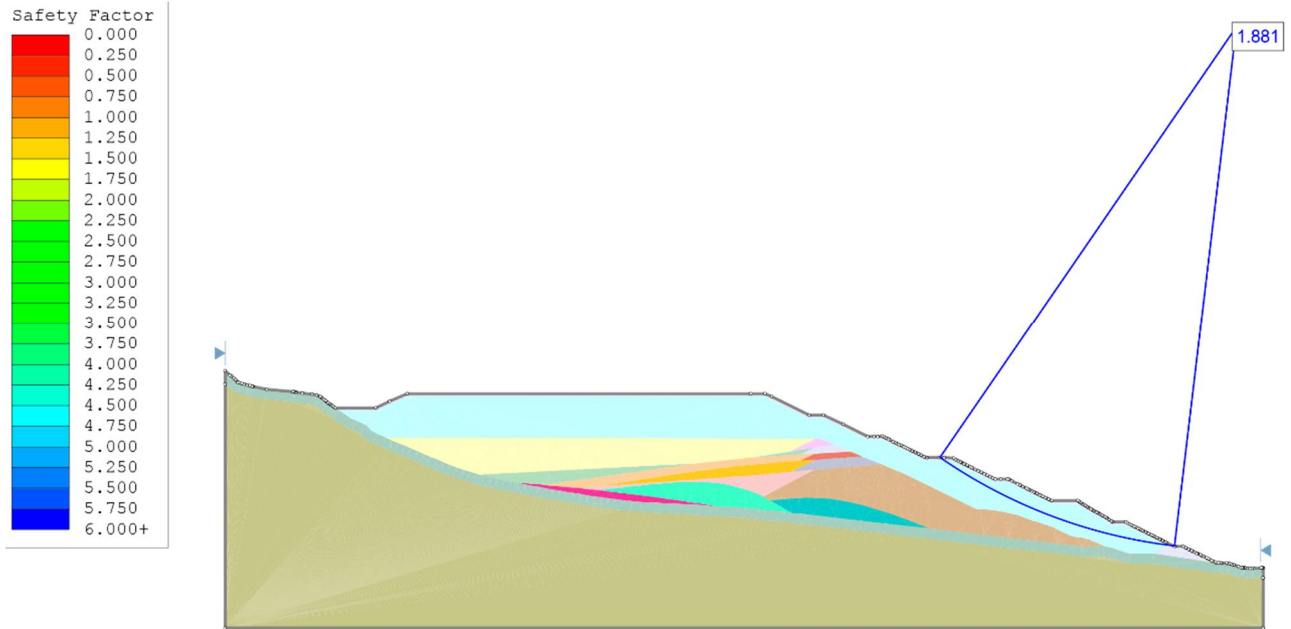


Figura AV-13 Análisis estático, corte 01-berma 7, lado norponiente, etapa 2 (E-02).  
Flopac, 2015f.

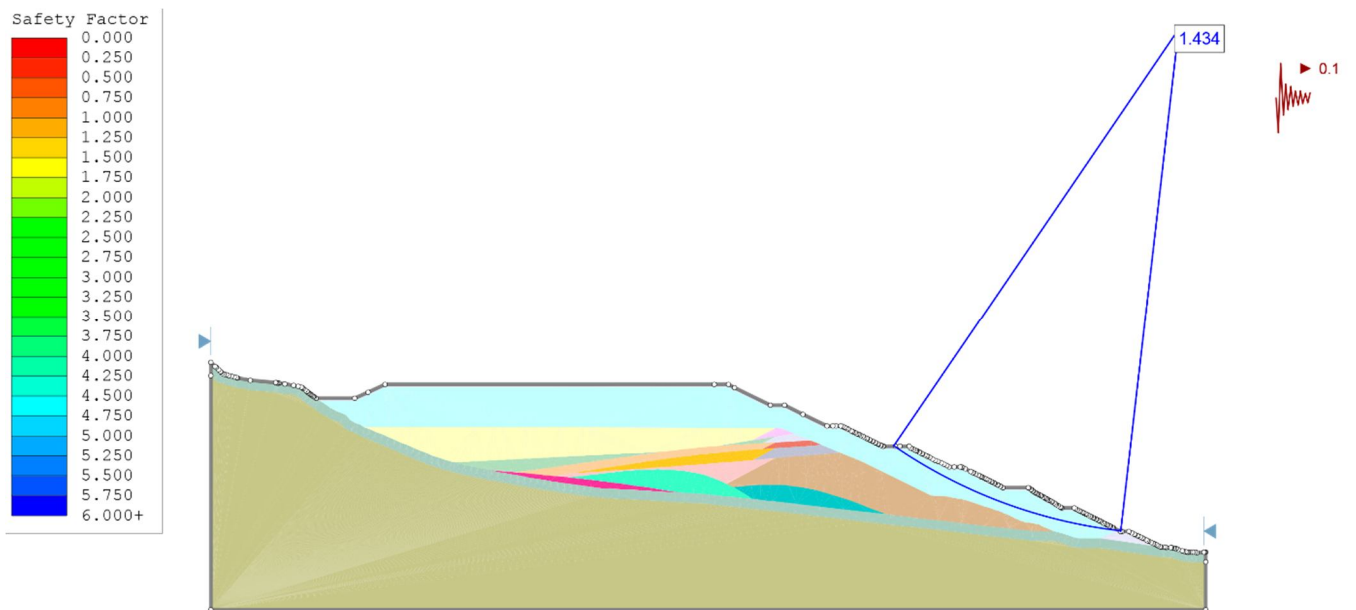


Figura AV-14 Análisis accidental por sismo , corte 01-berma 7, lado norponiente, etapa 2 (E-02).  
Flopac, 2015f.

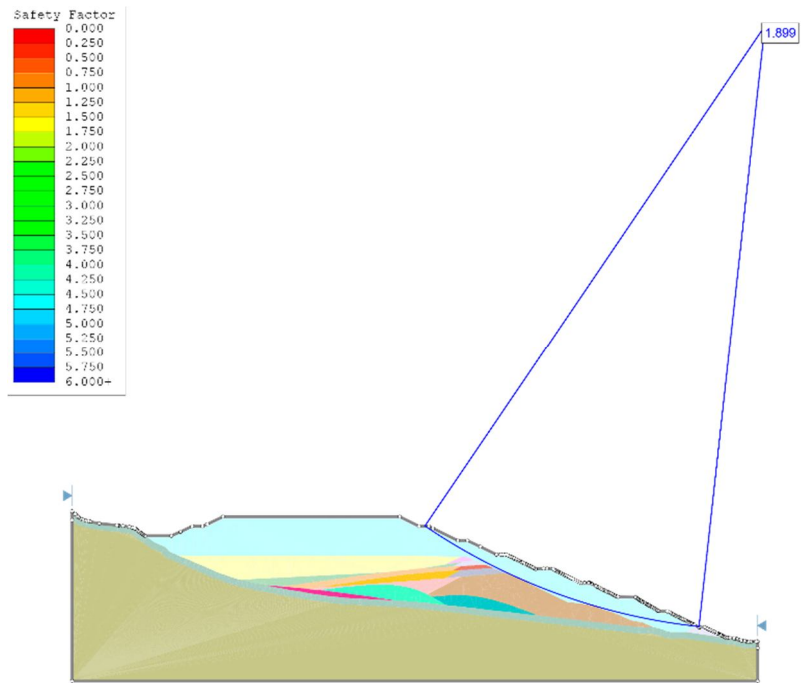


Figura AV-15 Análisis estático, corte 01-berma 8, lado norponiente, etapa 2 (E-02).  
Flopac, 2015f.

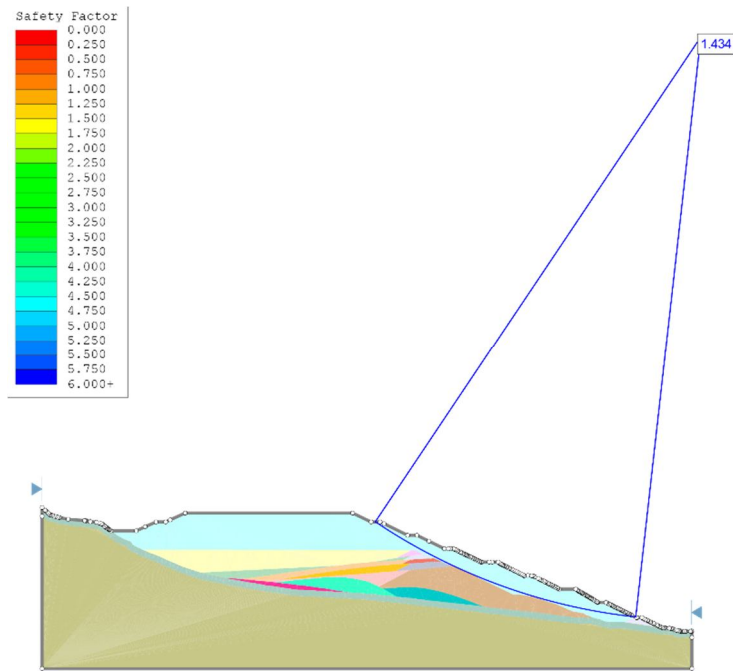


Figura AV-16 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 8, lado norponiente, etapa 2 (E-02).  
Flopac, 2015f.

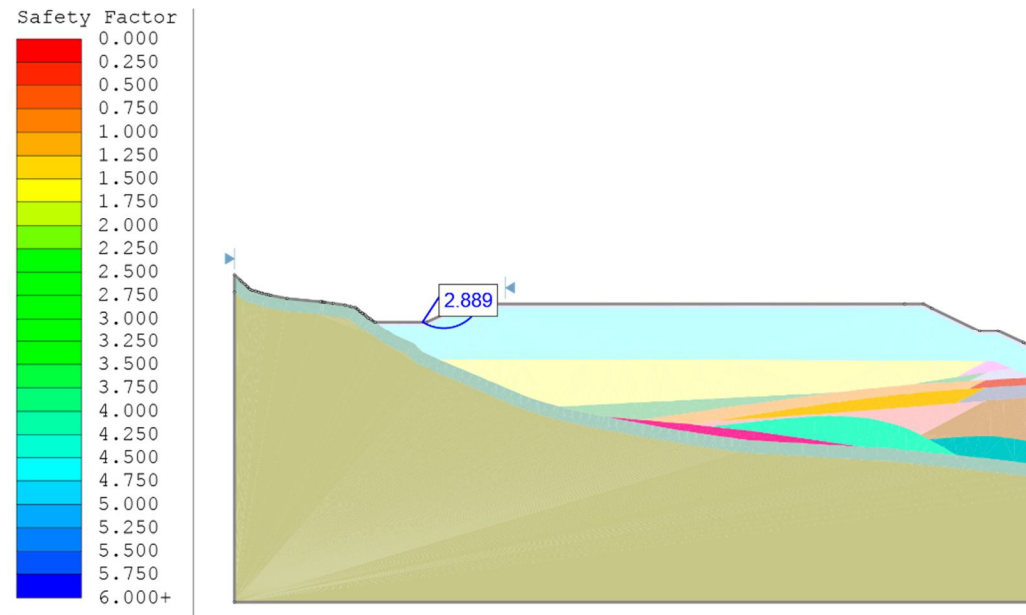


Figura AV-17 Análisis estático, corte 01-berma 7, lado noreste, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

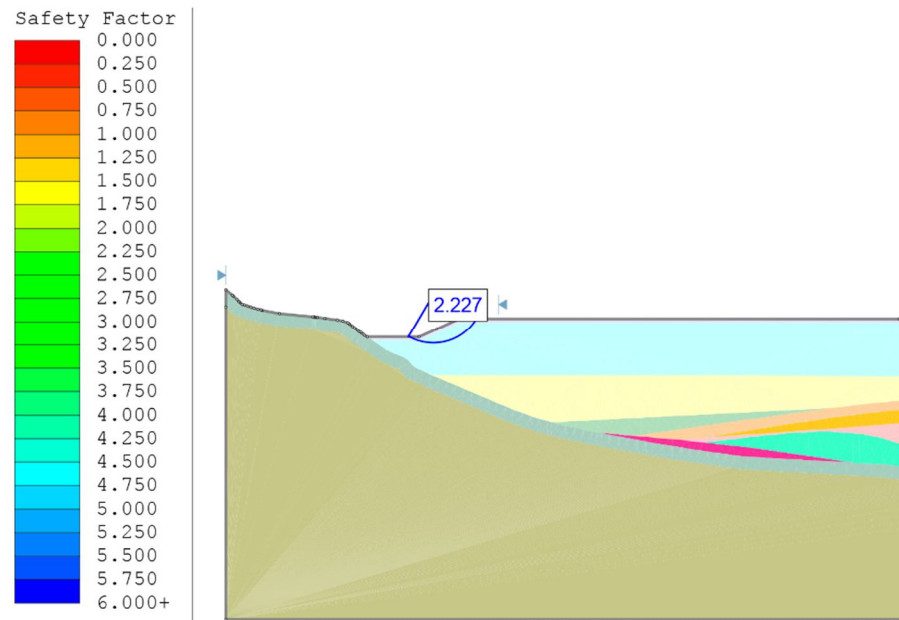


Figura AV-18 Análisis accidental por sismo , corte 01-berma 7, lado noreste, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

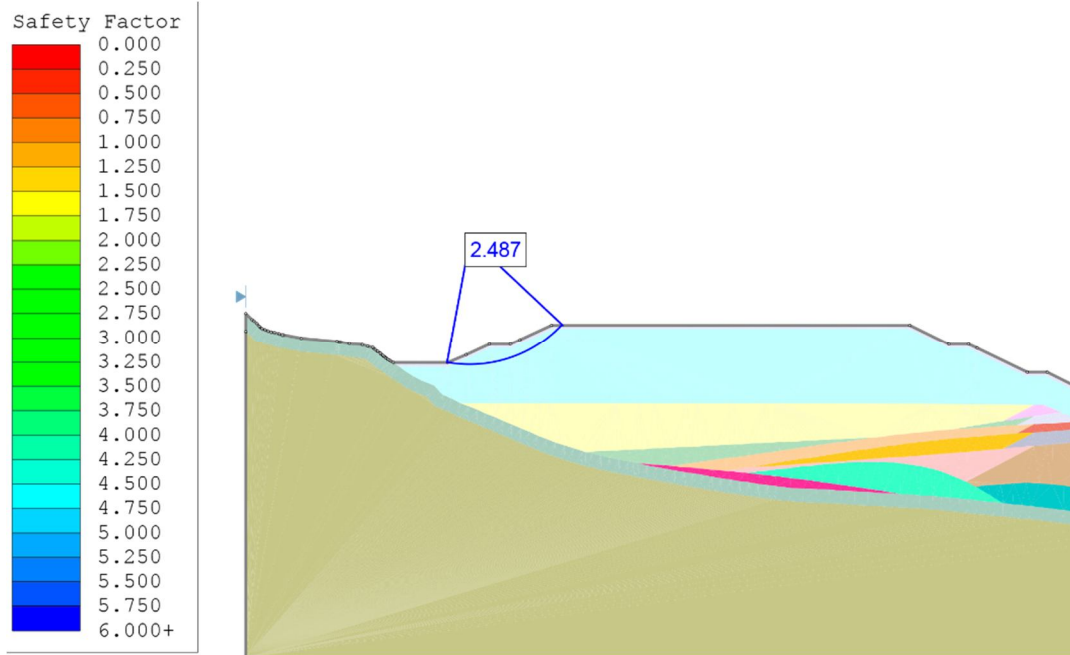


Figura AV-19 Análisis estático, corte 01-berma 8, lado noreste, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.

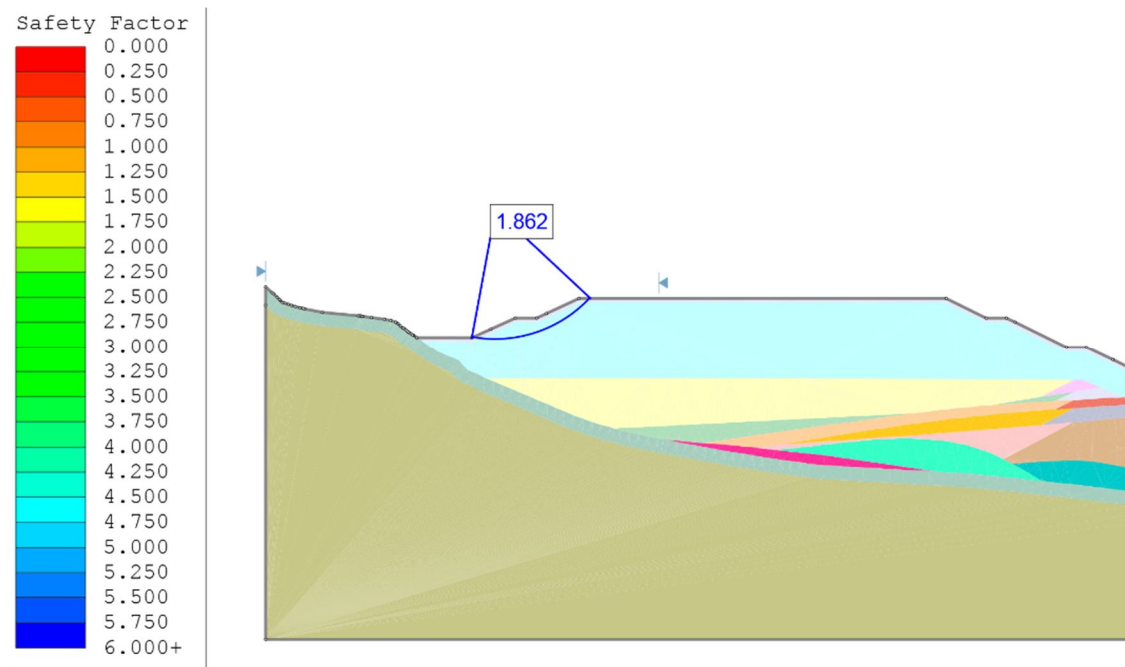


Figura AV-20 Análisis accidental por sismo, corte 01-berma 8, lado noreste, etapa 2 (E-02). Flopac, 2015f.