

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Ana María Quevedo Rico

Director:

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”

Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2015

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Ana María Quevedo Rico

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Maestría en Geotecnia

Director:

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Asesor externo:

William Ruiz Mogollón

Énfasis de investigación:

Geotecnia

Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”

Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2015

2015

Nota de Aceptación

Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá, Febrero de 2015

AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a Dios por que sin él no podría haber finalizado esta etapa en mi vida.

A mis padres y mi hermano por su continuo apoyo y motivación.

Y agradezco especialmente al Ingeniero Carlos Eduardo Rodríguez Pineda por su continua guía, colaboración y apoyo para lograr la culminación del presente trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	24
1.1	Descripción del problema	24
1.2	Objetivos.....	26
1.2.1	Objetivo general	26
1.2.2	Objetivos específicos	26
2.	MARCO TEÓRICO	27
2.1	Conceptos básicos de movimientos de tierra	27
2.2	Casos históricos	29
2.2.1	Terremoto del 31 de mayo de 1970 licuación de suelos en Chimbote, Perú. 29	
2.2.2	Terremoto del 22 de abril de 1991, Limón, Costa Rica.	31
3.	ANTECEDENTES DEL TACO 3	33
3.1	Estudios previos del Taco 3.....	33
3.2	Información de detalle del Taco 3 basada en estudios anteriores	35
3.2.1	Reseña histórica del evento sísmico (22 de Mayo de 1960)	35
3.2.2	Topografía	37
3.2.3	Descripción geológica	38
3.2.4	Unidades estructurales del Taco 3	40
3.2.5	Descripción del movimiento del Taco 3.....	42
3.3	Estudio sísmico.....	46
3.3.1	Aceleración máxima del terreno.....	47
4.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL TACO 3 ..	49
4.1	Metodología para establecer los parámetros geomecánicos de los materiales que conforman la ladera del Taco 3	49

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

4.1.1	Metodologías a partir de ensayos	49
4.1.2	Metodologías a partir de correlaciones empíricas	49
4.1.3	Metodología a partir de retro-análisis	53
4.2	Determinación de la aceleración crítica	53
4.3	Análisis de licuación	54
4.3.1	Parámetros sísmicos	55
4.3.2	Evaluación de la resistencia al corte cíclico del depósito de suelo	56
4.3.3	Evaluación de la probabilidad de licuación	58
4.4	Análisis de estabilidad	60
4.4.1	Descripción del software SLOPE/W 2007®	60
4.4.2	Descripción del software QUAKE/W 2007®	60
4.5	Análisis de flujo subsuperficial	61
4.5.1	Descripción del software SEEP/W 2007®	62
4.6	Análisis de esfuerzos y deformaciones por elementos finitos	62
5.	ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN NATURAL DEL TACO 3	65
5.1	Caracterización geotécnica	65
5.1.1	Propiedades índice	66
5.1.2	Parámetros de deformabilidad	69
5.1.3	Parámetros de permeabilidad	70
5.1.4	Parámetros de resistencia al corte	71
5.2	Evaluación de la aceleración crítica	84
5.2.1	Incremento en la presión de poros	86
5.3	Análisis de licuación	88
5.4	Análisis por elementos finitos	90
5.4.1	Análisis de redistribución de esfuerzos	90
5.4.2	Análisis de estabilidad	96

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

6.	ANÁLISIS DEL TACO 3 A PARTIR DEL CAMBIO DEL REGIMEN DE FLUJO DEBIDO AL represamiento del río san pedro.....	98
6.1	Descripción general del análisis	98
6.2	Modelo geológico de la ladera del Taco 3 después del deslizamiento	99
6.3	Caracterización geotécnica.....	100
6.4	Análisis de flujo subsuperficial	101
6.5	Análisis de estabilidad estático	109
6.6	Análisis dinámico	115
6.6.1	Señales sísmicas de diseño	116
6.6.2	Parámetros dinámicos de los materiales.....	119
6.6.3	Análisis dinámico – Esfuerzos y deformaciones	120
6.6.4	Análisis de estabilidad dinámico de la ladera del Taco 3	162
6.6.5	Análisis de deformaciones mediante el método de bloque deslizante de Newmark.....	190
7.	CONCLUSIONES	197
8.	REFERENCIAS.....	201

ANEXOS

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2-1. Clasificación de los movimientos según Cruden y Varnes (1996).	27
Cuadro 4-1. Relación entre la resistencia al corte no drenada (S_u) y número de golpes (N) del ensayo SPT. (NAVFAC DM-7.1, 1986).....	51
Cuadro 4-2. Relación entre el diámetro característico D_{10} y la permeabilidad k para suelos granulares (Lambe, 1979).	52
Cuadro 4-3. Correlaciones empíricas para estimar el módulo de Young E_s en diferentes tipos de suelo a partir del número de golpes (N) del ensayo de SPT.	52
Cuadro 5-1. Valores de las constantes k y n de la función de esfuerzo y confinamiento para la estimación del módulo tangente inicial E_i	70
Cuadro 5-2. Coeficiente de permeabilidad de los materiales que conforman el Taco3.....	71
Cuadro 5-3. Valores del parámetro de resistencia al corte no drenada (S_u) de los materiales que conforman el Taco 3.....	73
Cuadro 5-4. Cálculo del ángulo de fricción a partir correlaciones empíricas con los valores del número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT)	73
Cuadro 5-5. Parámetros de resistencia al corte para los estratos del Taco 3.....	75
Cuadro 5-6. Factores de seguridad obtenidos en condición pseudo-estática – no drenado.....	78
Cuadro 5-7. Resumen de parámetros de resistencia a partir del retro- análisis bajo condiciones no drenadas.	80
Cuadro 5-8. Análisis de sensibilidad sobre los estratos de limo del Taco 3, con variación de los parámetros de resistencia al corte drenada.	81
Cuadro 5-9. Resultados de análisis de estabilidad bajo condiciones estáticas para cada variación de c' y ϕ'	81
Cuadro 5-10. Resumen de resultados de los ensayos triaxiales realizados para los limos que conforman la ladera del Taco 3.	82
Cuadro 5-11. Resumen de parámetros geotécnicos de los materiales que conforman la ladera del Taco 3.....	83

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Cuadro 6-1. Resumen de parámetros geotécnicos de los materiales que conforman la ladera del Taco 3.....	100
Cuadro 6-2. Resumen de resultados del análisis de estabilidad para cada incremento en el nivel de agua del río San Pedro bajo condición estática	109
Cuadro 6-3. Resumen de los factores de seguridad obtenidos del análisis dinámico para el mecanismo de falla cauce del Río San Pedro.	163
Cuadro 6-4. Resumen de los factores de seguridad obtenidos del análisis dinámico para el mecanismo de falla en el escarpe principal del Taco 3.....	163
Cuadro 6-5. Resumen de resultados del análisis de sensibilidad del factor de seguridad con el incremento del nivel del río San Pedro	190

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Sitio del posible represamiento del río San Pedro inmediatamente aguas abajo del Taco 3.....	25
Figura 2-1. Tipos frecuentes de movimientos de falla de taludes (Adaptado de Cruden y Varnes, 1996).....	28
Figura 3-1. Área del Taco 3, antes del deslizamiento de mayo de 1960	37
Figura 3-2. Topografía del Taco 3 en condición actual.....	38
Figura 3-3 . Esquema litológico del deslizamiento denominado Taco 3. Modificado de Stanley Davis y Juan Karzulovic (1961).....	40
Figura 3-4. Unidades estructurales del Taco 3. Tomada de Davis & Karzulovic (1961)	42
Figura 3-5. Interpretación del movimiento del Taco 3. Modificado de Stanley Davis y Juan Karzulovic (1961)	44
Figura 3-6 . Deslizamiento Taco 3.	45
Figura 3-7. Ambiente tectónico (Tomada de Fischer, Álvarez, De la Llera y Riddell (2002))	46
Figura 3-8. Diversas curvas de atenuación propuestas para zonas de subducción	47
Figura 4-1. Representación esquemática del bloque deslizante (Duncan y Wright 2005).....	53
Figura 4-2. Diagrama de flujo para la evaluación del potencial de licuación a partir de resultados de ensayos SPT	55
Figura 4-3. Fronteras de susceptibilidad por licuación en función de (N1)60 (Youd et al., 2001).....	57
Figura 4-4. Diagrama de flujo del método de confiabilidad para la estimación de probabilidad de licuación (Tomado de J.H. Hwag et. al. (2004)).....	59
Figura 4-5. Curva de esfuerzo – deformación para el modelo hiperbólico.....	63
Figura 4-6. Curva de deformación normalizada en función al esfuerzo de confinamiento.....	64
Figura 5-1. Localización en planta de las exploraciones ejecutadas sobre el Taco 3. (Tomada de Ariztía y Vicuña (1968))	65

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 5-2. Perfil topográfico 3. (Modificada de Ariztía y Vicuña (1968)).	66
Figura 5-3. Resultados de ensayos de humedad natural y límites de Atterberg – Perforación S2.	67
Figura 5-4. Clasificación de los materiales mediante la Carta de Casagrande.	68
Figura 5-5. Modelo geológico de la ladera antes del deslizamiento.	69
Figura 5-6. Resultados del número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT)	72
Figura 5-7. Sección de análisis del Taco 3 con mecanismo de falla circular	76
Figura 5-8. Sección de análisis del Taco 3 con el mecanismo definido por Ariztía y Vicuña (1968).	77
Figura 5-9. Retro-análisis para la superficie de falla localizada sobre el estrato MH- ML.	79
Figura 5-10. Retro-análisis para la superficie de falla localizada sobre el estrato MH	79
Figura 5-11. Retro-análisis para la superficie de falla localizada sobre el estrato ML	79
Figura 5-12. Valores obtenidos a partir del análisis de sensibilidad y ensayos triaxiales.	82
Figura 5-13. Registro de aceleración – Terremoto de Valparaíso 03/03/1985 22:47:07 UTC. Estación Viña del Mar, Chile. Latitud & Longitud: -33.0200, - 71.5700. Componente 200. Tomada de la base de datos de United States Geological Survey (USGS).	84
Figura 5-14. Análisis pseudo-estático del Taco 3.	85
Figura 5-15. Determinación de la aceleración crítica.	85
Figura 5-16. Factor de seguridad vs ru bajo condición pseudoestática	87
Figura 5-17. Evaluación del potencial de licuación	88
Figura 5-18. Probabilidad de licuación de los estratos de la ladera del Taco 3	89
Figura 5-19. Esquema de la simulación de los movimientos retrogresivos sobre la ladera del Taco 3.	91
Figura 5-20. Cambio en el estado de esfuerzos efectivos horizontales ($\sigma'x$) para cada movimiento de tierra.	92

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 5-21. Cambio en el estado de esfuerzos efectivos verticales (σ_y) para cada movimiento de tierra simulado.	92
Figura 5-22. Esfuerzo vertical vs movimiento	93
Figura 5-23. Distribución de esfuerzos efectivos. Diagrama del círculo de Mohr...94	
Figura 5-24. Cambio en los desplazamientos horizontales (X) para cada movimiento de tierra.	95
Figura 5-25. Cambio en los desplazamientos verticales (Y) para cada movimiento de tierra.....	95
Figura 5-26. Análisis de estabilidad en condición estática por elementos finitos del Taco 3.....	96
Figura 5-27. Factores de seguridad vs tiempo.....	97
Figura 6-1. Modelo geológico de la ladera después del deslizamiento.....	99
Figura 6-2. Modelo del análisis de flujo estacionario sobre la ladera del Taco 3 .102	
Figura 6-3. Función Nivel del río– Variación del cambio de cabeza total en el tiempo.	103
Figura 6-4. Modelo del análisis de flujo transitorio sobre la ladera del Taco 3.....	103
Figura 6-5. Análisis de flujo estacionario – Distribución de las cabezas de presión (m).	105
Figura 6-6. Análisis de flujo estacionario – Distribución de las cabezas totales (m).	105
Figura 6-7. Análisis de flujo transitorio Primer incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas de presión (m).....	106
Figura 6-8. Análisis de flujo transitorio Primer incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas totales (m).....	106
Figura 6-9. Análisis de flujo transitorio Segundo incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas de presión (m).....	107
Figura 6-10. Análisis de flujo transitorio Segundo incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas totales (m).....	107
Figura 6-11. Análisis de flujo transitorio Tercer incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas de presión (m).....	108
Figura 6-12. Análisis de flujo transitorio Tercer incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas totales (m).....	108

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-13. Análisis de estabilidad condición estática – Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	110
Figura 6-14. Análisis de estabilidad condición estática – Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	110
Figura 6-15. Análisis de estabilidad condición estática – Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	111
Figura 6-16. Análisis de estabilidad condición estática – Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	111
Figura 6-17. Análisis de estabilidad condición estática – Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro	112
Figura 6-18. Análisis de estabilidad condición estática – Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro	112
Figura 6-19. Esquema descriptivo del mecanismo de falla en el cauce del Río San Pedro	113
Figura 6-20. Análisis de sensibilidad para diferentes niveles del río San Pedro a lo largo del mecanismo de falla en el cauce.	114
Figura 6-21. Análisis de estabilidad condición estática – Mecanismo de falla definido – Primer incremento del nivel del río San Pedro	115
Figura 6-22. Señal sísmica Valparaíso 03/03/1985 19:47, Viña del Mar. Componente 200.	117
Figura 6-23. Señal sísmica Tarapacá 13/06/2005 22:44, Poconchile ETNA, 275 – Componente horizontal.....	117
Figura 6-24. Señal sísmica Valparaíso 03/03/1985 19:47, Escalada para una aceleración máxima de 0,23g – Componente 200.....	117
Figura 6-25. Señal sísmica Valparaíso 03/03/1985 19:47, Escalada para una aceleración máxima de 0,41g – Componente 200.....	118
Figura 6-26. Espectro de respuesta del sismo Valparaíso (03/03/1985)	118
Figura 6-27. Espectro de respuesta del sismo Tarapacá (13/06/2005)	119
Figura 6-28. Funciones de módulo de corte normalizado y relación de amortiguamiento del material (Zhang et al, 2005).....	120
Figura 6-29. Modelo del análisis dinámico.....	121

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-30. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	122
Figura 6-31. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	122
Figura 6-32. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	123
Figura 6-33. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	123
Figura 6-34. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Primer incremento del nivel del río San Pedro	124
Figura 6-35. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Primer incremento del nivel del río San Pedro	124
Figura 6-36. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso. Segundo incremento del nivel del río San Pedro.....	125
Figura 6-37. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso. Segundo incremento del nivel del río San Pedro.....	125
Figura 6-38. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	126
Figura 6-39. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	126
Figura 6-40. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Segundo incremento del nivel del río San Pedro.....	127
Figura 6-41. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Segundo incremento del nivel del río San Pedro.....	127
Figura 6-42. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso. Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	128
Figura 6-43. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso. Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	128
Figura 6-44. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	129
Figura 6-45. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	129

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-46. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	130
Figura 6-47. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	130
Figura 6-48. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Tarapacá. Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	132
Figura 6-49. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Tarapacá. Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	132
Figura 6-50. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	133
Figura 6-51. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	133
Figura 6-52. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Primer incremento del nivel del río San Pedro	134
Figura 6-53. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Primer incremento del nivel del río San Pedro	134
Figura 6-54. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Tarapacá. Segundo incremento del nivel del río San Pedro.....	135
Figura 6-55. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Tarapacá. Segundo incremento del nivel del río San Pedro.....	135
Figura 6-56. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	136
Figura 6-57. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	136
Figura 6-58. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Segundo incremento del nivel del río San Pedro.....	137
Figura 6-59. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Segundo incremento del nivel del río San Pedro.....	137
Figura 6-60. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Tarapacá. Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	138
Figura 6-61. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Tarapacá. Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	138

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-62. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	139
Figura 6-63. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	139
Figura 6-64. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	140
Figura 6-65. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	140
Figura 6-66. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala menor. Primer incremento del nivel del río San Pedro	142
Figura 6-67. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala menor. Primer incremento del nivel del río San Pedro	142
Figura 6-68. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Primer incremento del nivel del río San Pedro	143
Figura 6-69. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Primer incremento del nivel del río San Pedro	143
Figura 6-70. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Primer incremento del nivel del río San Pedro	144
Figura 6-71. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Primer incremento del nivel del río San Pedro	144
Figura 6-72. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala menor. Segundo incremento del nivel del río San Pedro	145
Figura 6-73. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala menor. Segundo incremento del nivel del río San Pedro	145
Figura 6-74. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	146
Figura 6-75. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	146
Figura 6-76. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	147
Figura 6-77. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	147

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-78. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	148
Figura 6-79. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	148
Figura 6-80. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	149
Figura 6-81. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	149
Figura 6-82. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	150
Figura 6-83. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	150
Figura 6-84. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Primer incremento del nivel del río San Pedro	152
Figura 6-85. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Primer incremento del nivel del río San Pedro	152
Figura 6-86. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Primer incremento del nivel del río San Pedro	153
Figura 6-87. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Primer incremento del nivel del río San Pedro	153
Figura 6-88. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Primer incremento del nivel del río San Pedro	154
Figura 6-89. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Primer incremento del nivel del río San Pedro	154
Figura 6-90. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Segundo incremento del nivel del río San Pedro..	155
Figura 6-91. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Segundo incremento del nivel del río San Pedro..	155
Figura 6-92. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	156
Figura 6-93. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	156

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-94. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	157
Figura 6-95. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro	157
Figura 6-96. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	158
Figura 6-97. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	158
Figura 6-98. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	159
Figura 6-99. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	159
Figura 6-100. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	160
Figura 6-101. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro	160
Figura 6-102. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$)- Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro	164
Figura 6-103. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro	164
Figura 6-104. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$)- Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	165
Figura 6-105. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso: ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	165
Figura 6-106. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$)- Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	166
Figura 6-107. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	166
Figura 6-108. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$)- Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	167
Figura 6-109. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro.....	167

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-110. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$)- Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro	168
Figura 6-111. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro –Tercer incremento del nivel del río San Pedro	168
Figura 6-112. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$)- Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro	169
Figura 6-113. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	169
Figura 6-114. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro	170
Figura 6-115. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22$) - Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro	170
Figura 6-116. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	171
Figura 6-117. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22s$) - Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	171
Figura 6-118. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	172
Figura 6-119. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22$) - Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	172
Figura 6-120. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	173
Figura 6-121. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22s$) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	173
Figura 6-122. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro	174
Figura 6-123. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22$) - Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro	174
Figura 6-124. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	175
Figura 6-125. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22s$) - Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	175

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

- Figura 6-126. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)-
Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro....176
- Figura 6-127. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) -
Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro....176
- Figura 6-128. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)-
Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro ...177
- Figura 6-129. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) -
Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro ...177
- Figura 6-130. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)-
Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro 178
- Figura 6-131. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) -
Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro 178
- Figura 6-132. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)-
Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro 179
- Figura 6-133. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) -
Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro 179
- Figura 6-134. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)-
Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro....180
- Figura 6-135. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) -
Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro....180
- Figura 6-136. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)-
Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro....181
- Figura 6-137. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) -
Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro....181
- Figura 6-138. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40s$)-
Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro....182
- Figura 6-139. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_{ap}=21,66s$) -
Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro....182
- Figura 6-140. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40s$)-
Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro ...183
- Figura 6-141. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_{ap}=21,66s$) -
Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro ...183
-

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-142. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor (tf = 34,40s)- Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	184
Figura 6-143. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor (tap=21,66s) - Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	184
Figura 6-144. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor (tf = 34,40s)- Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	185
Figura 6-145. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor (tap=21,66s) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	185
Figura 6-146. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor (tf = 34,40s)- Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro....	186
Figura 6-147. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor (tap=21,66s) - Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro....	186
Figura 6-148. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor (tf = 34,40s)- Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro....	187
Figura 6-149. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor (tap=21,66s) - Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro....	187
Figura 6-150. Factor de seguridad vs Nivel de río – Sismo Valparaíso	188
Figura 6-151. Factor de seguridad vs Nivel del río – Sismo Valparaíso	189
Figura 6-152. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Cauce – Primer incremento del nivel del río San Pedro.....	191
Figura 6-153. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Escarpe principal – Primer incremento del nivel del río San Pedro	192
Figura 6-154. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Cauce – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	192
Figura 6-155. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Escarpe principal – Segundo incremento del nivel del río San Pedro	193
Figura 6-156. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Cauce – Tercer incremento del nivel del río San Pedro.....	193
Figura 6-157. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Escarpe principal – Tercer incremento del nivel del río San Pedro	194
Figura 6-158. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Cauce del río – Nivel del río en la EL.133 msnm	195

Figura 6-159. Deformación versus tiempo196

RESUMEN

El presente trabajo corresponde a la investigación realizada sobre el comportamiento dinámico de laderas ante el cambio en el régimen de flujo aplicado sobre un talud natural denominado Taco 3. El Taco 3 ha despertado el interés de varias investigaciones, dado que corresponde a un mega -deslizamiento que involucró el movimiento de 3,2 millones de volumen de tierra, producto de movimientos sísmicos registrados el 22 de mayo de 1960 ($M_w=9,5$) en cercanías de Valdivia, Chile. La investigación se divide en dos partes principales: La primera se basa en determinar los factores que indujeron el deslizamiento del Taco 3 y en la segunda se estudia la influencia que tendría un aumento súbito de los niveles normales del río San Pedro sobre la estabilidad del Taco 3 en su condición actual. Para el análisis del comportamiento dinámico de la ladera, se realizaron análisis de estabilidad por los métodos de equilibrio límite y elementos finitos, análisis de flujo, análisis de esfuerzos y deformaciones, y análisis dinámicos.

Palabras claves: Respuesta dinámica, estabilidad de taludes, deslizamiento del Taco 3, deslizamientos inducidos por sismo, amenaza sísmica, licuación.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

El 22 de Mayo de 1960 intensos movimientos sísmicos se registraron en cercanías de Valdivia, Chile. Estos movimientos entre los muchos deslizamientos que causó, produjeron tres grandes deslizamientos (denominados Taco1, Taco 2 y Taco 3) que causaron el taponamiento del lago Riñihue, situado a 65 km al Este de Valdivia. El nivel del lago aumento 26,5 m sobre el nivel normal de agua. Debido a lo anterior, se generó un embalse transitorio con nivel de aguas aproximadamente en la EL.123,00 msnm.

El mayor deslizamiento se produjo en la zona denominada Taco 3, localizado a 4,5 km del nacimiento del Río San Pedro. El Taco 3 tiene un área de 1,29 km² e involucra depósitos fluvioglaciares así como el tope de sedimentos glacio lacustres, con un volumen de tierra desplazado de $3,2 \times 10^7$ m³.

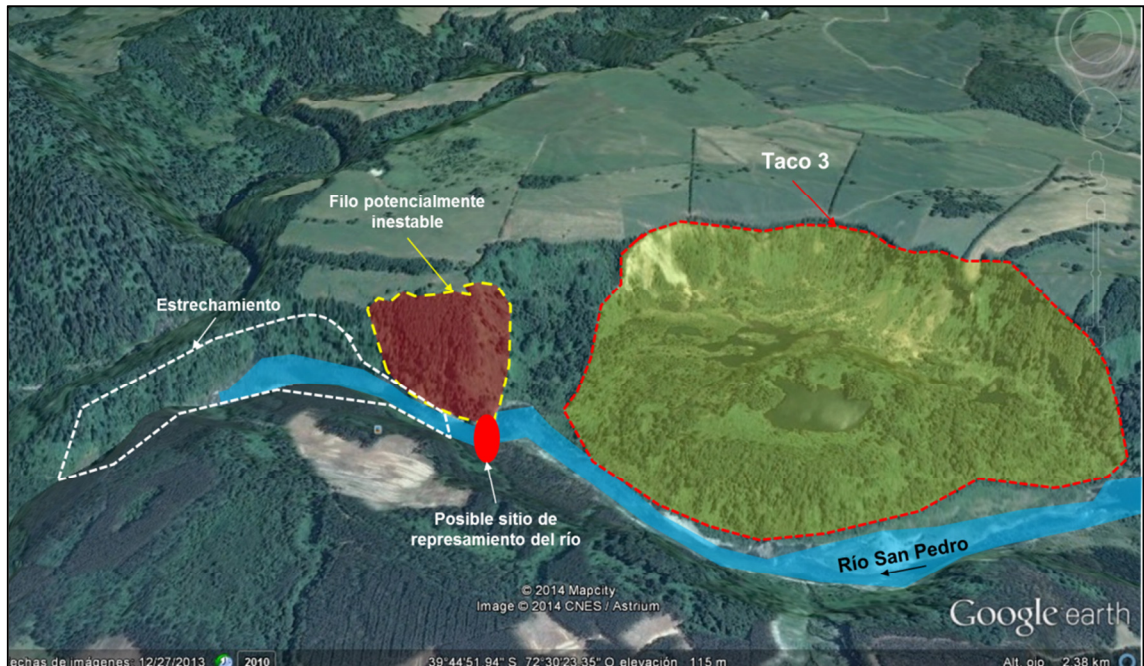
El terremoto que dio origen a los deslizamientos mencionados tuvo su epicentro a una distancia aproximada de 167 km del Taco 3 y una magnitud de Ms=8,5 y Mw=9,5, según Katsuyuki Abe (1970).

Para el presente estudio, se contempló analizar la influencia que tendría un aumento súbito de los niveles normales del río San Pedro sobre la estabilidad del Taco 3 en su condición actual, ocasionado por deslizamientos de sectores potencialmente inestables localizados en el filo de aguas abajo de dicho deslizamiento, cerca de un estrechamiento del río. (Véase Figura 1-1).

Basado en el nivel de aguas con el que posiblemente se represó el río San Pedro durante el sismo de Valdivia del 22 de mayo de 1960, se evaluaron tres niveles de incremento del río con respecto al nivel normal actual cerca del Taco 3 (EL.100,00 msnm):

- 5% de incremento respecto al nivel actual, lo que equivale a un posible embalse con nivel de aguas en la EL.105,90 msnm.
- 10% de incremento respecto al nivel actual, lo que equivale a un posible embalse con nivel de aguas en la EL.110,00 msnm.
- 50% de incremento respecto al nivel actual, lo que equivale a un posible embalse con nivel de aguas en la EL.150,00 msnm.

Figura 1-1. Sitio del posible represamiento del río San Pedro inmediatamente aguas abajo del Taco 3



Con el posible represamiento del río, cambiarían las condiciones de régimen de flujo de agua, afectando las laderas adyacentes del Río San Pedro, lo que puede generar potenciales superficies de falla.

La investigación acerca del comportamiento dinámico de laderas es un gran aporte para el análisis de estabilidad de taludes, dado el nivel de incertidumbre que aún existe en esta área. Los análisis por equilibrio límite no muestran o incluyen la influencia de todos los factores que condicionan la respuesta dinámica.

Adicionalmente, el estudio y análisis de los riesgos de movimientos de tierra, es fundamental para prevenir posibles catástrofes naturales. Sobre todo cuando se contemplan posibles represamientos de ríos por causa de movimientos de masa, como lo fue el Taco 3.

Evidencia de estos deslizamientos por el cambio en el régimen de flujo debido a la generación de embalses, es el caso de la presa de Vajont en Italia. La excavación de esta presa se inició en el año 1957 y finalizó en 1960. Esta presa considerada la más grande en su momento, tenía 264,6 m de altura, 160 m de ancho y capacidad de almacenamiento de 150 millones m³ de agua, (Gómez López de Munain, s.f.).

Durante el primer llenado en octubre de 1960 se observó en el talud un movimiento de 3,5 cm por día, dando lugar al primer deslizamiento de 700.000 m³. Para controlar el movimiento se construyeron galerías de drenaje y un túnel sobre

el estribo derecho. Para el segundo llenado se observaron nuevamente movimientos de tierra, pero en Diciembre de 1962 los movimientos empezaron a disminuir, siendo prácticamente nulos para Abril. Por tanto, se continuó con el tercer llenado, donde finalmente para el 9 de octubre de 1963 ocurrió un deslizamiento catastrófico con 260 millones de metros cúbicos de material. El agua desplazada resultante produjo que 50 millones de metros cúbicos de agua sobrepasaran la presa en una ola de 90 metros de altura. El mega tsunami consecuencia del deslizamiento destruyó totalmente el pueblo de Longarone y las pequeñas villas de Pirago, Rivalta, Villanova y Faè, matando a unas 2.000 personas (Gómez López de Munain, s.f.).

Por tanto, el determinar las condiciones iniciales por las cuales se generó el deslizamiento y la afectación que causaría el cambio en el flujo del agua debido al posible represamiento del río San Pedro por el taponamiento ocasionado por el movimiento de tierra del filo aguas abajo del Taco 3 (Véase Figura 1-1), permitirá evaluar condiciones de inestabilidad y establecer pautas para el estudio de deslizamientos de laderas en general.

Debido a lo anterior, es importante examinar el comportamiento de los suelos ante cargas sísmicas y la influencia que tienen los parámetros sísmicos tales como amplitud, contenido frecuencial y duración como detonante de deslizamientos. Así mismo, determinar los cambios en la estabilidad de la ladera debido a la variación en el flujo por el represamiento del Río San Pedro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la influencia del cambio en las condiciones de flujo por el represamiento del río San Pedro debido al posible deslizamiento del filo localizado inmediatamente aguas abajo del Taco 3 en el comportamiento dinámico del mismo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar los factores que indujeron la falla de la ladera en condición natural.
- Determinar el cambio en las condiciones de flujo en el talud del Taco 3 ocasionado por un posible represamiento del río San Pedro.
- Analizar la respuesta dinámica de la ladera con el cambio del régimen de agua producido por un posible represamiento del río San Pedro.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos básicos de movimientos de tierra

Los deslizamientos son movimientos gravitacionales de roca, residuos o tierra en dirección descendente y externa de la ladera. Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de las superficies de falla, por caída libre, movimientos en masa, erosión o flujos.

Para la caracterización de deslizamientos el sistema de clasificación más utilizado es el propuesto por Cruden y Varnes (1996), el cual tipifica los principales tipos de movimiento y se presenta en el Cuadro 2-1 y en la Figura 2-1 .

Cuadro 2-1. Clasificación de los movimientos según Cruden y Varnes (1996).

TIPO DE MOVIMIENTO	TIPO DE MATERIAL		
	ROCA	SUELO	
		GRANULAR	FINO
CAÍDAS	Caída de roca	Caídas de detritos	Caídas de suelos
VOLCAMIENTOS	Volcamiento de roca	Volcamiento de detritos	Volcamiento de suelos
DESPLAZAMIENTOS (ROTACIONAL y TRASLACIONAL)	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de suelos
PROPAGACIÓN LATERAL	Propagación de roca	Propagación de detritos	Propagación de suelos
FLUJO	Flujo de roca	Flujo de detritos	Flujo de Tierra

Las principales características de cada movimiento según la clasificación de Cruden y Varnes (1996) describen a continuación:

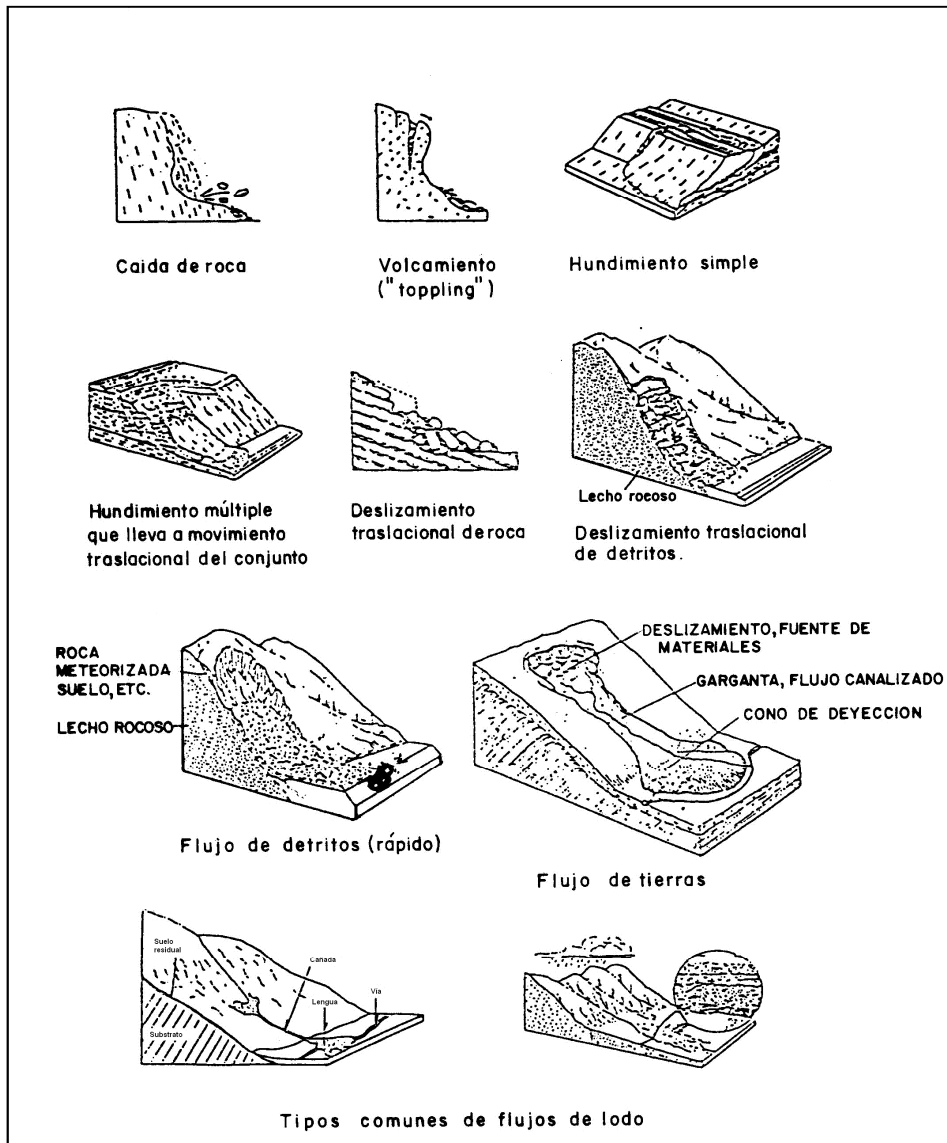
1. Caídas: Masas desprendidas de pendientes muy fuertes o escarpes, que se mueven en caída libre, dando tumbos (saltos) o ruedan ladera abajo.
2. Volcamientos: Rotación de uno o más elementos alrededor de un punto pivote.
3. Deslizamientos: El movimiento incluye cizalladura a lo largo de uno o más planos discretos. Pueden ser rotacionales o traslacionales en su movimiento. El movimiento rotacional se da donde la superficie de ruptura es curva, la masa rota hacia atrás alrededor de un eje paralelo a la ladera. Mientras que el movimiento traslacional se da cuando la superficie de ruptura es más o menos

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

planar o suavemente ondulada y la masa se mueve paralela a la superficie del terreno.

4. Propagación lateral: Movimiento de extensión lateral acompañado por fracturamiento cortante o tensional.
5. Flujos: masas que se mueven como unidades deformadas, viscosas, sin un plano discreto de ruptura.
6. Movimientos complejos: El movimiento consiste en una combinación de dos o más tipos de los tipos principales.

Figura 2-1. Tipos frecuentes de movimientos de falla de taludes (Adaptado de Cruden y Varnes, 1996)



2.2 Casos históricos

En la presente sección se describe un breve resumen de casos históricos de eventos sísmicos que han causado grandes catástrofes como el terremoto de Valdivia de Mayo 1960.

2.2.1 Terremoto del 31 de mayo de 1970 licuación de suelos en Chimbote, Perú.

Generalidades

El 31 de mayo de 1970 a las 15:23 (hora local) la ciudad de Chimbote ubicada en la costa norte del Perú a 400 Km de Lima, fue sacudida por un terremoto con magnitud de ondas superficiales (M_s) de 7.8. El evento sísmico produjo la licuación de los depósitos de suelo sobre los cuales se encuentra cimentada la ciudad de Chimbote. Este caso histórico de licuación es considerado como el más catastrófico en Perú y ha sido la base para numerosas investigaciones. Los lugares como Recuay, Aija, Casma, Huarmey, Carhuaz y Chimbote la destrucción de edificios osciló entre 80% y 90%. En la ciudad de Huaraz con el resto de ciudades y pueblos del Callejón de Huaylas también fueron destruidos casi por completo. La tercera ciudad en importancia, Yungay terminó sepultada junto a Ranrahirca por un alud.

Evento sísmico

Este evento sísmico de subducción entre placa oceánica (Nazca) y la placa continental produjo un sismo con magnitud $M_s=7.8$ y profundidad focal de 45 km con epicentro aproximadamente a 50 km de la costa del Perú, al oeste de la ciudad de Chimbote. El sismo activó un acelerógrafo en Lima, cuya aceleración máxima corregida fue de 0,11 g. En Chimbote no se registraron aceleraciones; sin embargo, la máxima intensidad del sismo se calculó en IX grados en la escala de intensidades Mercalli Modificada.

Geología

La geología del área está representada por tres tipos de constituyentes: el Volcánico Casma (derrames andesíticos y riolíticos), el Intrusivo (granodiorita) y el Cuaternario (depósitos de arenas eólicas). Chimbote se ubica en la planicie aluvional del río Lacramarca, con una longitud de 10 km por 5 km de ancho. Por el norte limita con cerros de origen volcánico y por el sur del abanico aluvional, el depósito desciende gradualmente llegando a pantanos y lagunas. Las montañas tienen pendientes suaves y planicies amplias, consistentes en depósitos de gran espesor de arena gruesa y grava. En las zonas costeras el mar ha formado líneas de playa recientes y antiguas que consisten en capas de arenas laminares con conchuelas. En la parte sur de Chimbote existen capas gruesas de arena eólica

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

reciente. El abanico aluvional del río Lacramarca está dividido por pequeños valles que consisten de arenas limosas con o sin restos orgánicos.

Caracterización de los suelos de la ciudad de Chimbote

El material presente es muy permeables en el subsuelo de Chimbote, con permeabilidades del orden de $k=8 \times 10^{-4}$ m/s, y nivel freático presente entre los 0 y 20 metros.

Se puede afirmar que la ciudad de Chimbote se desplanta sobre un depósito potente de arena con niveles superficiales de agua, siendo susceptible de sufrir licuación, produciendo asentamientos diferenciales a las edificaciones. En la mayor parte de la ciudad la arena tiene una compacidad media a densa, con valores de número de golpes (N) entre 10 a 30 del ensayo de penetración estándar (SPT). La estratificación general del área que abarca la ciudad, se encuentra constituida por arena densa subyacida por la roca basal; sin embargo, en otras zonas el valor de N es inferior a 10 con nivel freático superficial.

Consecuencias debidas al fenómeno de licuación

Según el documento Dr. Ing. Jorge E. Alva Hurtado (Breve historia del fenómeno de licuación de suelos en el Perú) menciona que Ericksen et al (1970) y Plafker et al (1971) indicaron que en Casma, Puerto Casma y en zonas cercanas al litoral en Chimbote, se produjo desplazamiento lateral del terreno causado por licuación de depósitos deltaicos y de playa, ocasionando grietas en el terreno que derrumbaron las estructuras que las cruzaron. Las áreas más extensas de volcanes de arenas se formaron a lo largo del río Casma, entre Casma y Puerto Casma. Los volcanes tenían un cráter central de unos cuantos centímetros a 1 m de diámetro, cercados por un montículo de arena y limo de hasta 15 m de diámetro. Se produjeron eyecciones de agua de un metro de altura. La zona central de Chimbote fue evidentemente un área de licuación de suelos, así como de compactación diferencial de la cimentación. El puente de Casma fue dañado por licuación de la cimentación de los estribos. En Chimbote y Casma y a lo largo de la Carretera Panamericana se notaron subsidencias superficiales producto de la licuación. La sección residencial de Puerto Casma mostró evidencias de asentamientos y eyección de agua. Cluff (1971) reportó fallas del terreno en Chimbote debido a depósitos de playa saturados y sueltos. En Casma se produjo compactación diferencial y desplazamiento lateral del terreno debido a licuación. Se produjeron inundaciones del terreno por agua freática, debido a la compactación diferencial. En muchas áreas se produjeron volcanes de arenas y eyección de agua por existir nivel freático alto.

Berg y Husid (1973) indicaron evidencia de licuación de suelos en la cimentación del Colegio Mundo Mejor, en Chimbote. Carrillo (1970) indicó descensos en los terraplenes de acceso de casi todos los puentes de la Carretera Panamericana y asentamientos en las plataformas del Terminal Marítimo de Chimbote. También se

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

presentó evidencias del fenómeno de licuación en los depósitos de arenas saturadas en la calle Elías Aguirre en Chimbote y en el km. 380 de la Carretera Panamericana, cerca de Samanco. Corporación Hidrotécnica y C. Lotti (1979) reportaron licuación generalizada en Puerto Casma, produciendo agrietamientos de suelo y eyecciones de agua con arena. En Chimbote se produjeron numerosos casos de licuación y Puerto Casma se inundó totalmente. Morimoto et al (1971) describieron el fenómeno de licuación de suelos en la ciudad de Chimbote. En la zona pantanosa se produjo licuación generalizada, con grietas debido a compactación diferencial; y en la zona aluvial licuación subsuperficial con grietas y volcanes de arena.

2.2.2 Terremoto del 22 de abril de 1991, Limón, Costa Rica.

Generalidades

El 22 de Abril de 1991 a las 15:57 (hora local) en Puerto Limón o Limón ubicada a una distancia de 152 kilómetros al este de San José, capital de Costa Rica, en la costa del Mar Caribe ocurrió un movimiento telúrico con una magnitud de 7,7 en la escala sismológica de magnitud de momento, que afectó severamente el litoral Caribe de Costa Rica y Panamá. El movimiento sísmico produjo la licuefacción de grandes áreas constituidas por un subsuelo de depósitos fluviales no consolidados del cuaternario, que produjo volcanes de arena observados principalmente en lugares cercanos a la costa, que eyectaron agua con arena y barro a alturas de 5 m y dejaron en el suelo cráteres de hasta 2 m de diámetro.

Evento sísmico

Según la Red Sismológica Nacional (RSN, ICE-UCR, 1991), el evento fue generado por la súbita ruptura de una falla inversa de bajo ángulo, en un movimiento de sobre corrimiento. El bloque superior, coincidente con parte de la costa del caribe de Costa Rica se desplazó hacia el NE. El epicentro del sismo se ubica a 39,5 km al suroeste del puerto de Limón a una profundidad de 16,44 km.

La estación acelerográfica más cercana localizada a 61 km del epicentro en Siquirres, registró una aceleración pico de 0,44g. Las intensidades fueron más elevadas en la región costera conformada por depósito aluvial, en donde se registraron valores máximos de IX a X.

Geología

La región fronteriza entre Costa Rica y Panamá se encuentran dentro de la zona de interacción de tres placas tectónicas mayores: Caribe, Nazca y Coco.

Según el texto de Sergio Mora y Susumu Yasuda (1994), los sectores en los que se ocurrió licuación están constituidos por tres tipos de subsuelo: 1) bancos aluviales continentales 2) barras arenosas litorales y playas y 3) áreas litorales, márgenes de los ríos, estuarios y lagunas.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Caracterización de los suelos de la ciudad Limón

La zona donde se presentó licuefacción son áreas de subsuelo de depósitos aluviales no consolidados del cuaternario localizadas hasta varios kilómetros tierra adentro de la costa. Presencia en el subsuelo de arenas finas entre 4 y 10 m de profundidad y arenas medias entre 3 y 9 m en presencia de nivel freático somero (nivel freático en superficie).

Consecuencia por Licuación

El sismo provocó graves daños en una extensa área de las provincias de Limón y Cartago, Costa Rica y en la provincia de Bocas del Toro Panamá. Las zonas más afectadas en Puerto Limón se encuentran en terrenos de origen aluvial al oeste, Noroeste y Sur este de Limón a lo largo de la costa Atlántica.

Se presentaron volcanes de arena observados principalmente en lugares cercanos a la costa, que eyectaron agua con arena y barro a alturas de 5 m y dejaron cráteres en el suelo de hasta 2 m de diámetro. La carretera Nacional No.32 fue dañada severamente en una longitud aproximadamente de 40 km presentando una fractura central al eje de la carretera, provocando el desplazamiento lateral hacia ambos lados del relleno y volcanes de arena en cercanías a esta. El camino que conduce entre Moin y Boca Matina se observaron deslizamientos laterales, fracturación de pavimento hacia las leves depresiones del terreno en el fondo de los canales, lagunas litorales y pantanos, causando el arrastre de la banca. En la población de Matina y alrededores ocurrieron asentamientos y basculamiento de viviendas, volcanes de arena, desplazamientos laterales y fracturación del suelo alrededor del cauce del río Matia. Cerca de 3.000 km² fueron afectados por licuefacción.

3. ANTECEDENTES DEL TACO 3

3.1 Estudios previos del Taco 3

- Davis & Karzulovic (1961). Deslizamientos en el Valle del río San Pedro Provincia de Valdivia Chile.

El documento contiene un estudio técnico desde el punto de vista geológico del deslizamiento ocurrido en el sitio denominado Taco 3, y hace una detallada interpretación del movimiento de remoción de masas. Dada la cercanía del estudio realizado por Davis & Karzulovic con los deslizamientos ocurridos en 1960, este texto ha sido de gran importancia para el desarrollo de varias investigaciones.

En el estudio se presenta la morfología general de la zona, un bosquejo geológico y la descripción geológica del deslizamiento del Taco 3.

La interpretación del movimiento del Taco 3 está basada en los antecedentes geológicos y topográficos y la descripción se realizó para distintas etapas del mismo. El movimiento lo interpreta como un deslizamiento de bloques y derrumbe de escombros; indica que deslizamientos secundarios ocurren dentro del deslizamiento mayor con movimientos de rotación y flujos de tierra, y concluye que el fenómeno ocurre por la ruptura y fracturamiento de las capas de limo y arena adyacentes generados por el sismo de 1960.

En el documento, sus autores registran las evidencias del terreno que permitieron establecer que se trató de un movimiento principal de bloques deslizados, y localizan con detalle de la época la disposición de los depósitos, flujos y bloques removidos. Por tanto, estiman que la licuación fue un fenómeno secundario en relación con el movimiento de 1960, que habría sido esencialmente, del tipo de deslizamiento de bloques.

- Ariztía y Vicuña. (1968). Deslizamientos en el Riñihue. 21 de mayo de 1960.

Este documento es una tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Santiago de Chile, y tuvo como propósito principal el estudio de los detonantes del deslizamiento del Taco 3.

Contiene información recopilada de antecedentes, entre la cual se incluye la caracterización geológica de la zona, descripción de los eventos ocurridos el 22 de Mayo de 1960 y algunos eventos históricos.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Se realizó el estudio del terreno con la ejecución de prospecciones del suelo en las cuales se realizaron ensayos de campo y ensayos de laboratorio para la caracterización geotécnica de los materiales que constituyen el Taco 3.

Adicionalmente, incluye el estudio topográfico anterior y posterior al deslizamiento, que junto con la caracterización geotécnica se determinó la posición y forma de la superficie de deslizamiento.

Se efectuaron ensayos triaxiales consolidados no drenados con medición de presión de poros, sobre los limos por los cuales se estableció que pasaría la superficie de falla. La razón de la elección de este tipo de ensayos es por la similitud del comportamiento durante el deslizamiento, dado que la poca permeabilidad del limo y la rapidez con la que ocurrieron los eventos, no dio cabida a que existiera algún drenaje.

Con base en la caracterización de los materiales y el estudio topográfico se realizaron análisis de estabilidad en condición estática y sísmica para un coeficiente de aceleración horizontal de 0,20g.

A partir de los valores de resistencia dinámica para realizado para las arcillas y limos se observó que algunos sectores del talud habrían sufrido esfuerzos superiores a la resistencia dinámica de estos suelos. Por tanto, esto habría inducido la falla en dichos sectores, lo cual por un mecanismo de falla progresiva habría conducido al derrumbe total.

- G. Noguera y E. Garcés (1990). Deslizamientos en el río San Pedro Analizados 30 años después.

Este trabajo contiene la descripción de los hechos sucedidos en la época especialmente del Taco 3, las medidas de mitigación adoptadas y análisis complementarios, concluyendo que se produjo licuación de un estrato limo arenoso.

Contiene información recopilada de antecedentes, entre la cual se incluye la descripción geológica de la zona, topografía del Taco 3, resumen de las investigaciones geotécnicas realizadas y antecedentes sísmicos.

Se realizó el análisis pseudoestático y la evaluación del potencial de licuación en la ladera del Taco 3, con lo cual se estableció que hubo licuación de los estratos limosos.

3.2 Información de detalle del Taco 3 basada en estudios anteriores

Con base en la información de los estudios realizados anteriormente y que se describieron en el numeral 3.1, se presenta la descripción geológica, climatológica, geográfica y la evaluación de las condiciones sísmicas del Taco 3.

3.2.1 Reseña histórica del evento sísmico (22 de Mayo de 1960)

El sismo del domingo 22 de mayo de 1960 registrado a las 15:11 hora local (UTC-4), es conocido como el Gran Terremoto de Chile. Su epicentro se localizó en cercanías de la ciudad de Valdivia, Chile, con una magnitud de 9,5 en la escala sismológica de magnitud de momento, siendo el mayor registrado en la historia de la humanidad.

Según lo descrito por Davis & Karzulovic (1961), el 22 de mayo de 1960, a las 15:11, la región del Sur de Chile comprendida entre los paralelos 38° y 44° fue devastada por fuertes movimientos sísmicos que se sumaban a los que, el día anterior y cerca de las 6 de la mañana, habían afectado intensamente la zona ubicada entre los paralelos 36° 30' y 38°.

El sismo consecuentemente produjo un maremoto, que borró poblados como Puerto Saavedra, Corral y Queule, afectando un área de 400.000 m². El tsunami también tuvo efectos catastróficos en diversas zonas a lo largo del océano Pacífico, como Japón, Hawai, California y Nueva Zelanda (Departamento Educativo Museo Histórico Nacional, s.f.).

Los movimientos del 22 de mayo de 1960 provocaron numerosos deslizamientos y derrumbes dentro de toda la zona asolada, especialmente en las inmediaciones de la Cordillera Andina. Por su magnitud y consecuencias posteriores, los fenómenos más notorios fueron aquellos del valle del río San Pedro que represaron en tres partes su cauce e impidieron, durante dos meses, el drenaje normal del Lago Riñihue.

Desde el nacimiento del río hacia aguas abajo, los tres grandes deslizamientos fueron llamados, respectivamente, Taco 1, Taco 2 y Taco 3. El último era de mayores dimensiones y alcanzaba, en su parte más baja, una altura del orden de los 29 m por encima del nivel normal del Lago Riñihue.

Detrás de las represas configuradas por los tacos, fue subiendo lenta y consecuentemente el nivel del agua con un promedio cercano a los 45 cm diarios y con un embalse, por cada centímetro, equivalente a poco menos de 1'000.0000 de metros cúbicos de agua.

A finales de mayo de 1960, la empresa Nacional de Electricidad ENDESA, se ocupó de la evacuación de las aguas por medio de la construcción de un canal de evacuación a través de los tres Tacos. El desagüe se inició el 24 de Julio de 1960,

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

con un caudal de salida inicialmente bajó que aumentó rápidamente hasta alcanzar un caudal máximo de $7500 \text{ m}^3/\text{s}$ el 26 de Julio. Posteriormente el caudal fue disminuyendo gradualmente, registrando un caudal de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ para el 2 de agosto.

**Fotografía 3-1. Obstrucción del Lago Riñihue. El gigantesco despliegue para solucionar el problema se conoció como “La Epopeya del Riñihue”.
Colección Archivo fotográfico. Museo Histórico Nacional.**



El canal de desagüe para Febrero de 1961, por observaciones realizadas por Davis & Karzulovic en el lugar, constituía el nuevo lecho del río San Pedro.

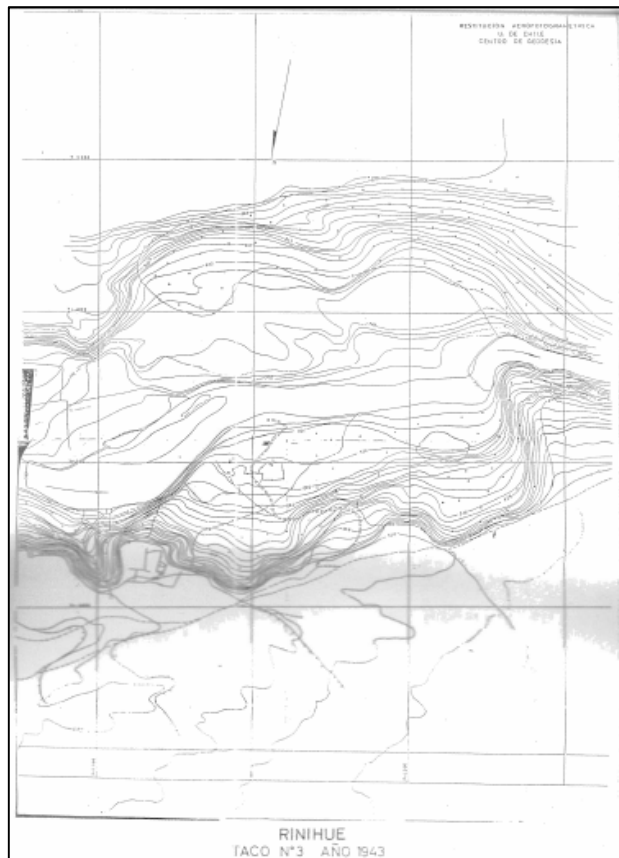
**Fotografía 3-2. Obstrucción del desagüe del Lago Riñihue. Colección archivo
fotográfico. Museo Histórico Nacional.**



3.2.2 Topografía

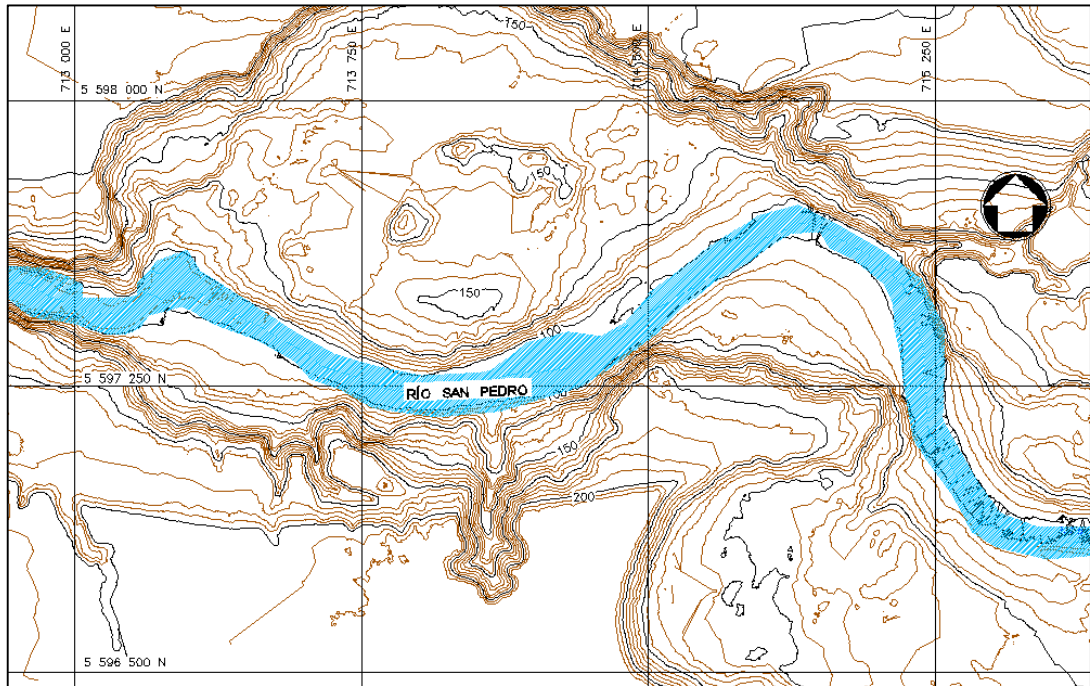
Para el estudio del comportamiento de la ladera del Taco 3 para la condición natural, se requirió la topografía antes de ocurrido el deslizamiento. En el documento realizado por Ariztía y Vicuña (1968), a partir de un plano confeccionado por Endesa, fotografías aéreas anteriores y posteriores al sismo se presenta el plano topográfico escala 1:5000 del Taco 3 antes de la ocurrencia del sismo. (Véase Figura 3-1).

Figura 3-1. Área del Taco 3, antes del deslizamiento de mayo de 1960



Para los análisis en condición actual se partió de la restitución topográfica escala 1:1000 que abarca el Taco 3 con posterioridad al sismo, presentado en el documento de Ariztía y Vicuña (1968). Y con la herramienta Google Earth y Civil 3D se realizó la actualización de la topografía con curvas de nivel cada cinco metros como se presenta en la Figura 3-2.

Figura 3-2. Topografía del Taco 3 en condición actual



3.2.3 Descripción geológica

Con base en la información geológica suministrada por el servicio nacional de geología y minería de Chile y los estudios geológicos realizados por Rodríguez et. al (1999) y Moreno & Gibbons (2007) , se presenta a continuación un breve resumen acerca de la geología presente en la zona del Taco 3 y el área de embalse debida al represamiento del río San Pedro.

El área del Taco 3 y zonas adyacentes se encuentran sobre un basamento compuesto por rocas metamórficas foliadas de edad paleozoica que se apoyan sobre conglomerados de edad Triásica, así como depósitos piroclásticos correspondientes al Terciario Superior y Cuaternario, siendo los depósitos más recientes los relacionados a procesos fluvio-glaciares que originarían la actual cuenca hidrográfica del río San Pedro.

Las unidades geológicas presentes en el área, se describen a continuación y se muestran en la Figura 3-3:

3.2.3.1 Rocas metamórficas del Complejo Bahía Mansa (Pz)

Esta unidad está compuesta de una secuencia continua de rocas metamórficas de bajo grado provenientes de un protolito sedimentario de granulometría fina (arcilla-arena fina) que al ser sometidas a cambios de temperatura y presión se transforman en rocas como esquistos y meta-areniscas. Los esquistos en su mayoría altamente orgánicos (grafito) y muy laminados (láminas de 1 mm a 2 mm)

se intercalan con esquistos más claros, micáceos y menos orgánicos con foliación más gruesa (3 mm – 2 cm).

3.2.3.2 Depósito Glaciolacustre (Qgl)

Corresponde a una secuencia de arcillas, limos y arenas finas grises, rítmicamente laminadas, presentes en la base de los escarpes a lo largo del cauce del río San Pedro desde su nacimiento en el lago Riñihue hasta el bloque noreste del lineamiento de falla Estero Llecué.

Características sedimentarias y estratigráficas tales como una granulometría fina dominante, la presencia de sedimentos finamente estratificados y sedimentos con laminación fina (varvas), localización geográfica, ausencia de deformación continua (pliegues) a lo largo de sus afloramientos, denota un ambiente lacustre de depositación para estos sedimentos relacionado a pequeños lagos localizados en el frente de los lóbulos.

3.2.3.3 Tobas y Tefras volcánicas (Qv)

Depósitos piroclásticos compuestos por intercalaciones de tobas y tefras de composición intermedia, se observan en la margen derecha en zonas cercanas al nacimiento del río San Pedro, evidenciándose estratigráficamente sobre depósitos de origen Glaciolacustre. Su origen se relaciona a flujos de piroclastos que viajan como una combinación de sólido y gas muy concentrado, siendo sus depósitos en general topográficamente controlados, rellenando valles y depresiones.

Estos flujos se emplazan a muy altas temperaturas (desde 350° C hasta unos 800° C) denotándose la presencia de restos de madera carbonizada, coloración rosada por oxidación termal y partículas soldadas entre sí.

3.2.3.4 Terrazas Fluvioglaciares (Qt)

Depósitos fluvioglaciares caracterizados litológicamente por gravas con moderada a buena selección, subredondeadas a redondeadas en matriz de arena gruesa, se encuentra interestratificada con lentes de arena y en algunos sectores con limos grises, los clastos presentan predominio de composición volcánica (dacitas, andesitas, granitoides y pómez).

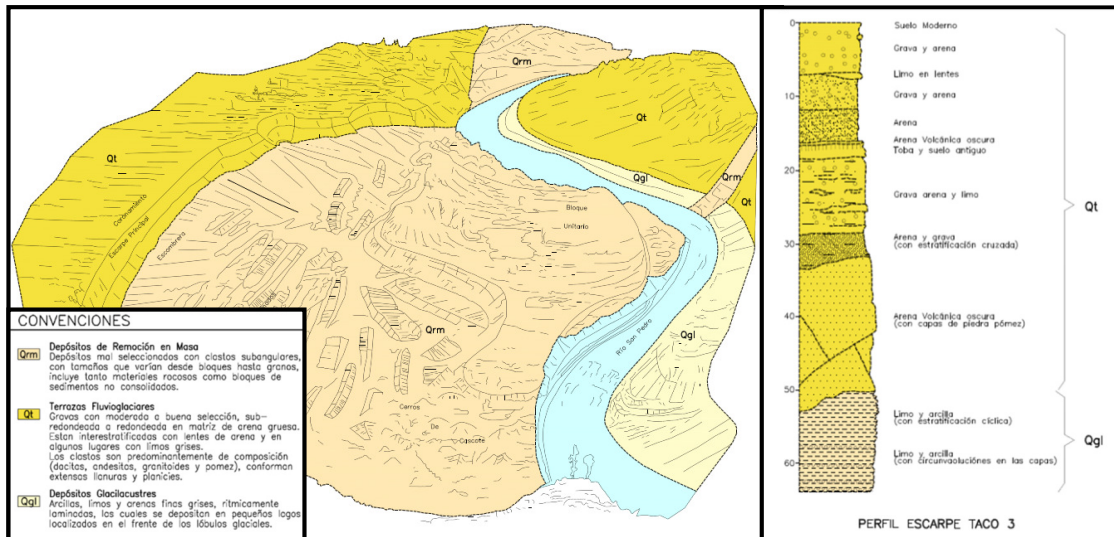
Geomorfológicamente conforman extensas llanuras y planicies, las cuales al ser disectadas por valles fluviales, generan escarpes verticales con alturas mayores a 30 m, las cuales evidencian procesos de desestabilización (movimientos de remoción en masa) ante movimientos telúricos tal como ocurrió durante los terremotos de Valdivia de 1960, formándose grietas en la unidad geológica con consecuente movimiento en masa tal como se observa en la zona del “Taco 3”.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

3.2.3.5 Depósitos de remoción en masa (Qrm)

Depósitos originados como consecuencia de fenómenos de remoción en masa los cuales se encuentran presentes a lo largo de cauce del río San Pedro (presentes aguas arriba de la Falla Estero-Llecué). Se caracterizan por presentar granulometrías mal seleccionadas con clastos subangulares, de tamaños que varían desde gránulos hasta bloques, incluye tanto material rocoso, como bloques de material no consolidado.

Figura 3-3 . Esquema litológico del deslizamiento denominado Taco 3. Modificado de Stanley Davis y Juan Karzulovic (1961)



Adicionalmente, se consideró el depósito de morrena glaciar descrito por Davis & Karzulovic (1961), quienes presentan el estudio del origen geológico y naturaleza de los distintos materiales que conforman el Taco 3.

3.2.3.1 Morrena glaciar cementada

Se localiza en la ribera Norte del río San Pedro principalmente en la quebrada Ñacul, descansando directamente sobre la roca metamórfica y se supone, por lo tanto, que corresponde a la unidad más baja de la secuencia del Pleistoceno. La morrena es rica en arcilla, de un color gris oliva, densa y resistente a la erosión por el agua corriente. El volumen total de la morrena compuesta por clastos mayores de 20 cm, se calcula en menos del 5%.

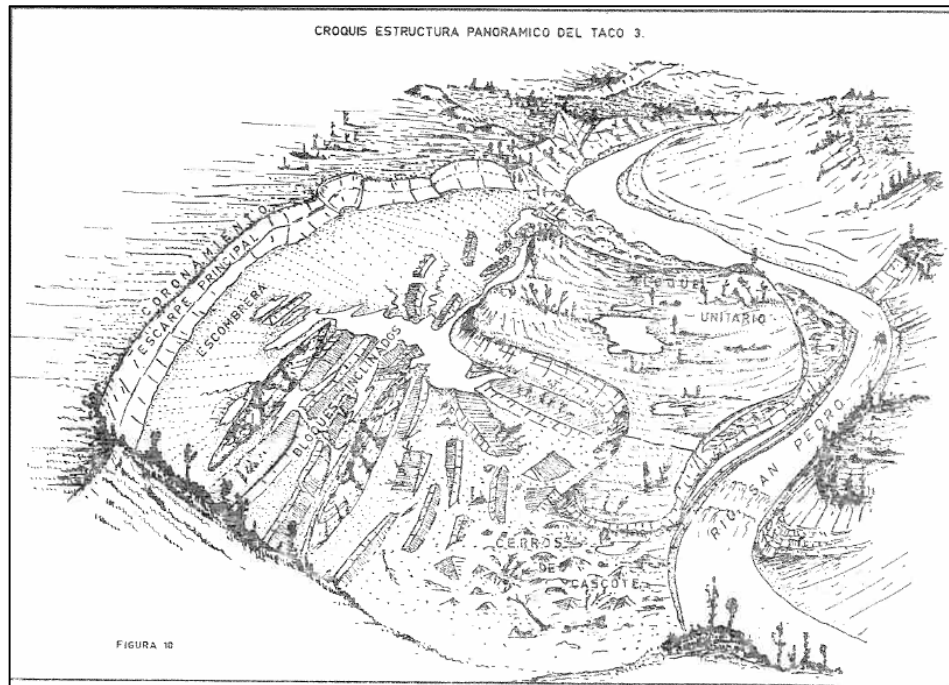
3.2.4 Unidades estructurales del Taco 3

La estructura del Taco 3, incluye miles de fallas con pequeños desplazamientos, fracturas, pliegues, bloques inclinados y zonas de escombros. Las unidades estructurales se tomaron de la descripción realizada por Davis & Karzulovic (1961) y se presentan en la Figura 3-4.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

- **Fracturas del coronamiento:** Se encontraron grandes fracturas de coronamiento, sobre las extremidades oriental y occidental del Taco 3. Sobre la parte oriental la fractura tiene aproximadamente 4 cm de ancho con un desplazamiento entre 5 a 10 cm, y distancia horizontal de 70 m. En la parte occidental se encuentra 3 fracturas con una distancia horizontal aproximada de 100 m.
- **Escarpe principal:** Percibe una forma arqueada con varias irregularidades menores. Los cortes del escarpe cuentan con una altura entre 45 a 60 m y una extensión en dirección Este Oeste de aproximadamente 1 km. La superficie del escarpe tiene una inclinación de alrededor de 60 a 70° de la horizontal.
- **Escombrera:** Se extiende por espacio de 100 a 200 m fuera de la base del escarpe principal. La superficie tiene una pendiente que varía entre 10 a 12° de la horizontal. La mayor parte de la superficie está conformada por bloques de derrumbe que se han desprendido del escarpe.
- **Bloques inclinados:** Una serie de bloques inclinados bordea la parte inferior de la escombrera. Algunos de los más grandes de estos bloques en las cercanías de la escombrera están parcialmente rodeados por material de derrumbe, otros se encuentran parcialmente rodeados por pequeños lagos. Los bloques son alargados y en su mayor parte orientados de Noreste a Sureste.
- **Bloque unitario fracturado:** El área total de deslizamiento fue de 1,26 km², de la cual la quinta parte de la superficie original que equivale a 0,24 km², esta subyacida por un solo bloque. La superficie de dicho bloque se encuentra cubierta por vegetación que existía con anterioridad al deslizamiento. La mayor parte de los árboles están casi verticales, exceptuando los que se encuentran sobre los bordes Norte y Sur que tienden a inclinarse hacia el centro.
- **Cerros de cascote:** La unidad externa del Taco 3, es una masa de sedimentos muy fracturados compuestos principalmente por arcillas y limos lacustres. A pesar del aspecto desordenado de los cascotes, cada cerro está compuesto por material homogéneo. Las superficies de los cerros de cascote son irregulares y se interpretan como material de deslizamiento que ha movido hacia afuera el área del escarpe principal con un máximo fracturamiento, pero con muy poco volcamiento dentro de la masa.

Figura 3-4. Unidades estructurales del Taco 3. Tomada de Davis & Karzulovic (1961)



3.2.5 Descripción del movimiento del Taco 3

El Taco 3 es el movimiento de remoción en masa más sobresaliente en el valle del río San Pedro, como consecuencia del terremoto del 22 de mayo de 1960 en cercanías a Valdivia (Chile). El deslizamiento comprende un área de 1,26 km² e involucra depósitos fluvioglaciares así como el tope de sedimentos glaciolacustres, los cuales colapsaron según la mecánica de movimiento descrita por Davis & Karzulovic (1961). La interpretación del movimiento se describe a continuación:

- Estado 1: El sistema se encuentra en equilibrio; los taludes fluvioglaciares (Qt) reposan sobre los depósitos fluvioacustres (Qfl), siendo la erosión fluvial sobre los taludes el único proceso dominante (ver Figura 3-5).
- Estado 2: Ocurre el fenómeno detonante (movimiento telúrico), el cual genera rompimiento a lo largo del talud por superficies rotacionales, las cuales se horizontalizan cerca del contacto entre el depósito fluvioglaciar (Qt) y el depósito glaciolacustre (Qgl) generando una zona de transición producto de saturación y desacomodamiento de las partículas (ver Figura 3-5).
- Estado 3: Ocurre propagación lateral en dirección al cauce del río San Pedro, a través de la superficie horizontal de material fracturado, movimiento que genera distensión a lo largo de la masa propagada, produciendo

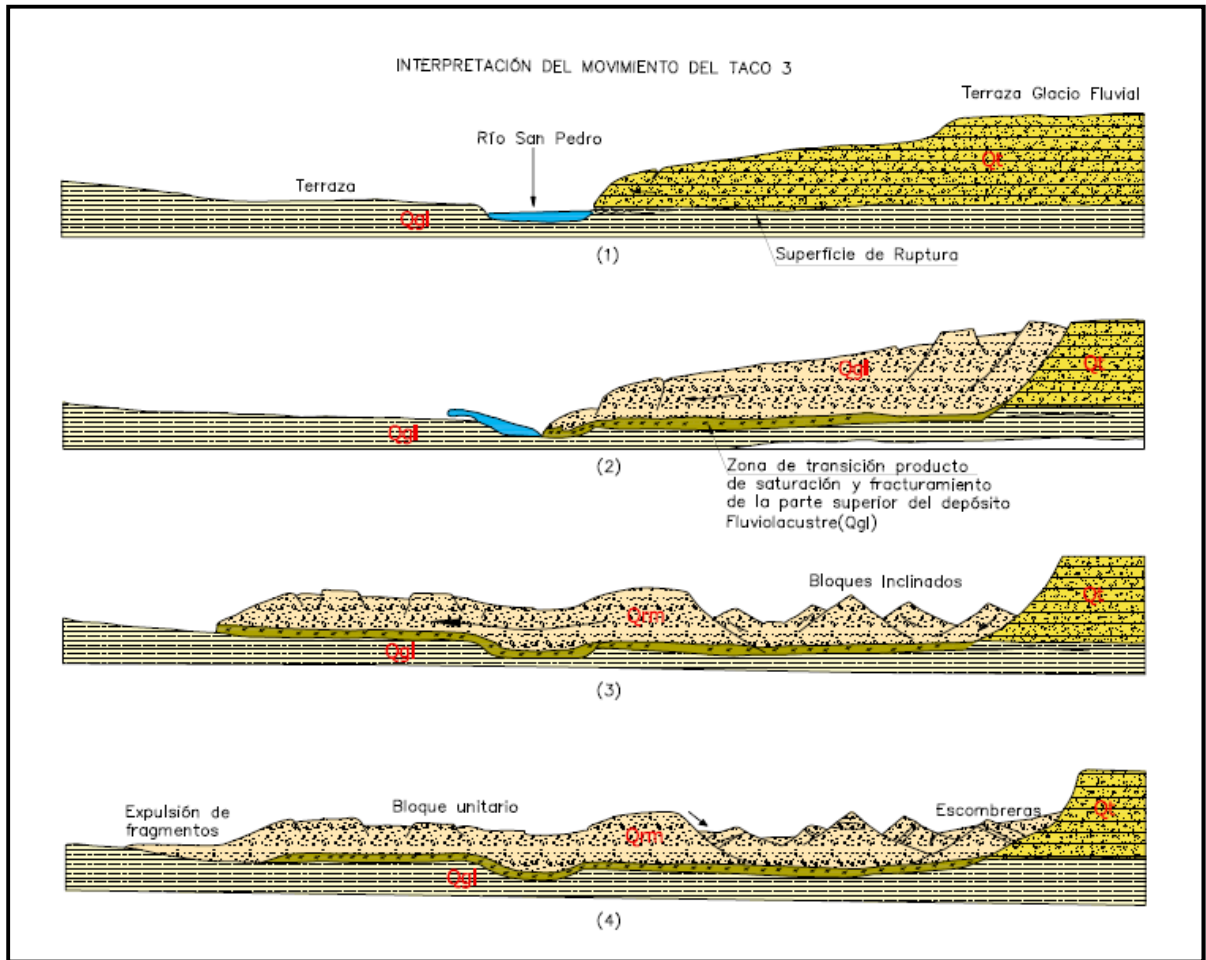
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

reacomodamiento de los bloques mediante superficies de fallamiento normal (ver Figura 3-5).

- Estado 4: Continúa la propagación lateral de la masa de sedimentos junto con el reacomodamiento de los bloques, como consecuencia de la distensión generada, aparecen grietas radiales hacia la punta o uña del deslizamiento, acompañadas de expulsión de fragmentos, hasta el momento donde la masa deslizada encuentra equilibrio entre su profundidad y longitud evidenciado en la pérdida total de movimiento (ver Figura 3-5).

El Taco 3 se puede definir como un movimiento complejo, en el cual existieron variables tales como presencia de materiales permeables y de granulometría variada. Las características litológicas y estructurales de los materiales que conforman el Taco 3 hicieron que se desarrollara este tipo de movimiento de tierra, en la cual ante el movimiento telúrico registrado en 1960, detonó el agrietamiento superficial de las terrazas fluvioglaciares (Qt).

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS



CONVENCIONES

- [Qrm]** **Depósitos de Remoción en Masa**
Depósitos mal seleccionados con clastos subangulares, con tamaños que varían desde bloques hasta granos, incluye tanto materiales rocosos como bloques de sedimentos no consolidados.
- [Qt]** **Terrazas Fluvio-glaciares**
Gravas con moderada a buena selección, sub-redondeada a redondeada en matriz de arena gruesa. Están interstratificadas con lentes de arena y en algunos lugares con limos grises. Los clastos son predominantemente de composición (dacitas, andesitas, granitoides y pomez), conforman extensas llanuras y planicies.
- [Qgl]** **Depósitos Glacilacustres**
Arcillas, limos y arenas finas grises, rítmicamente laminadas, las cuales se depositan en pequeños lagos localizados en el frente de los lóbulos glaciales.

Figura 3-5. Interpretación del movimiento del Taco 3. Modificado de Stanley Davis y Juan Karzulovic (1961)

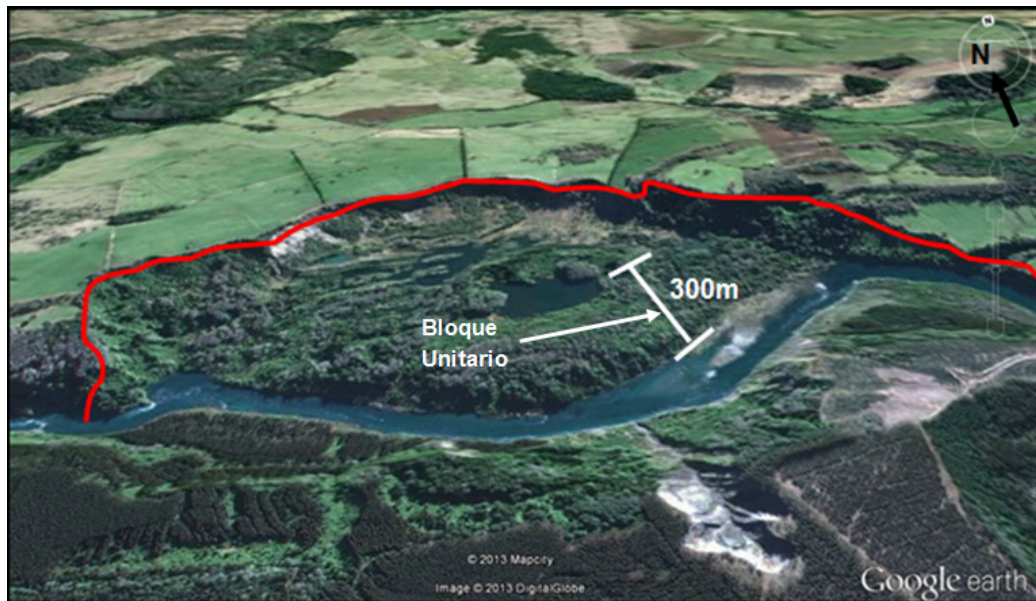
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Fotografía 3-3. Panorámica de la zona de deslizamiento Taco 3, nótese la acumulación de materiales no consolidados producto del deslizamiento hacia el valle del río San Pedro.



Entre los datos más relevantes de este movimiento se destaca el desplazamiento de aproximadamente 300 m de un bloque unitario a lo largo de una superficie de deslizamiento, en materiales glacio-lacustres, de muy baja pendiente, con energía suficiente para sobrepasar el cauce del río San Pedro y llegar hasta el límite topográfico de la ladera opuesta del valle y el cizallamiento del material al respaldo del bloque unitario.

Figura 3-6 . Deslizamiento Taco 3.

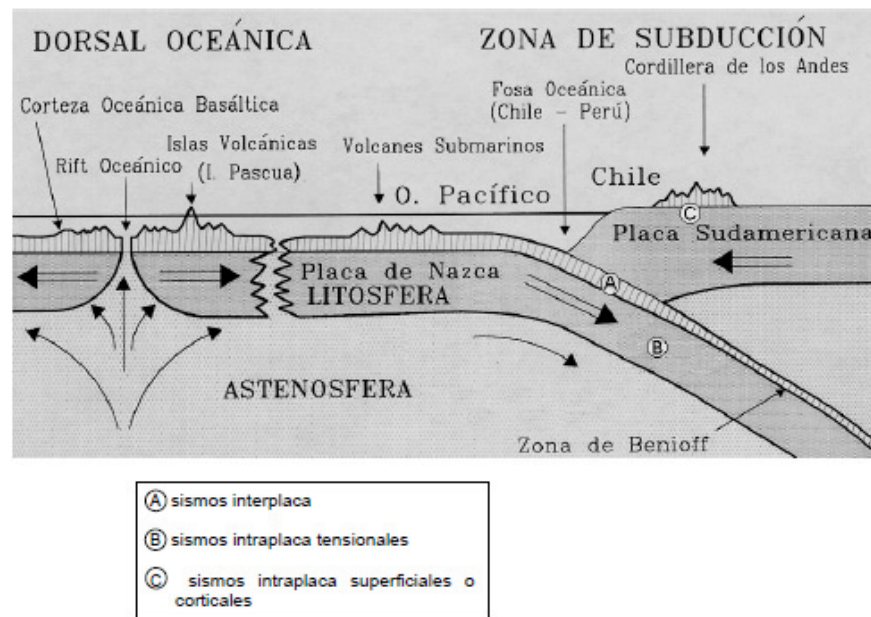


3.3 Estudio sísmico

De los estudios de evaluación sísmica en Chile realizados por Martin (1990), Fischer, Álvarez, De La Llera y Riddell (2002) y Crempien (2001), se presenta a continuación un breve resumen de la sismicidad en la zona donde se localiza la ladera del Taco 3.

La sismicidad principal de la zona, está relacionada al mecanismo de subducción de la placa oceánica de Nazca bajo el continente Sud-Americano, convergencia que se desarrolla a una velocidad promedio del orden de 10 cm/año. Esta interacción, genera sismos interplaca en el plano de Benioff (Zona A, Véase Figura 3-7). Las condiciones sismogénicas en la zona más superficial del plano de Benioff son tales que pueden producir, en general, eventos mayores que aquellos generados en la porción que se profundiza hacia el interior del continente y bajo la Cordillera de Los Andes.

Figura 3-7. Ambiente tectónico (Tomada de Fischer, Álvarez, De la Llera y Riddell (2002))



La actividad más profunda está típicamente relacionada a rupturas asociadas al estado tensional de la placa subducente que se sumerge en la astenósfera (parte superior del manto) generando eventos intraplaca (zona B, Véase Figura 3-7).

La actividad cortical (zona C en Figura 5) suele ocurrir en la zona Andina. En particular en esta zona destaca la actividad asociada a la falla Liquiñe-Ofqui del tipo “strike-slip” de aproximadamente 1100 km de longitud.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

La sismicidad del área de estudio fue analizada por Crempein (2001) usando una base de datos obtenida de las fuentes de CERESIS y del USGS, esta base de datos agrupo sismos dentro de un área comprendida entre el 69° y 75° de longitud oeste y 36° y 72° de latitud sur.

El terremoto del 22 de Mayo de 1960 tuvo su epicentro a una distancia aproximada de 180 km del Taco 3 y una magnitud de momento de $M_w=9,5$.

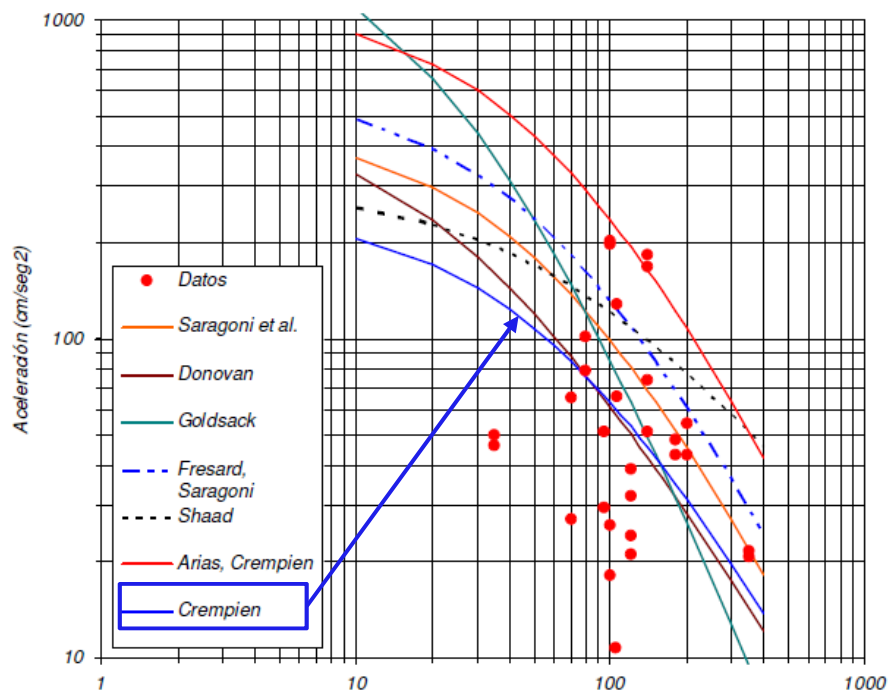
3.3.1 Aceleración máxima del terreno

Para determinar la aceleración horizontal en la zona del Taco 3 se seleccionó la ley de atenuación propuesta por Crempein (2001), con una recopilación de 1500 datos de sismos en Chile.

Para el estudio Crempein realizó primero la revisión de la sismicidad local evaluando la relación de terremotos ocurridos con magnitudes mayores o iguales a una magnitud dada, estableciendo la ley de Gutenberg y Richter que relaciona el número N de sismos por año de magnitud igual o mayor a una magnitud dada M, para la zona de influencia sísmica.

Con la base de datos de aceleraciones máximas horizontales del terreno, Crempein obtuvo una curva de atenuación, con lo cual se determinaron dos niveles de riesgo sísmico de 0,22 g para 500 años y 0,24 g para 1000 años. La curva de atenuación propuesta por Crempein (2001) se presenta en la Figura 3-8.

Figura 3-8. Diversas curvas de atenuación propuestas para zonas de subducción



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

La curva de atenuación descrita anteriormente es del tipo:

$$a_{max} = \frac{c_1 e^{c_2 M}}{(R_1 + c_3)^{c_4}}$$

Que incluye la desviación estándar con el objeto de considerar la incertidumbre de los datos.

En que c_1 , c_2 , c_3 y c_4 son constantes y en este caso los valores obtenidos para el modelo corregido son: $c_1=18543,30$ (cm/s^2), $c_2 = 0,698$, $c_3 = 60$ (Km) y $c_4 = 1,90$. La distancia epicentral R_1 de donde se registró el sismo al Taco 3 es de 167 km.

Empleando la ecuación de atenuación de Crempain y con la información del sismo obtenida del USGS (United States Geological Survey), se obtuvo la siguiente aceleración máxima:

$$a_{max} = 233,56 \text{ cm/s}^2$$

Por lo tanto,

$$PGA = 0,25 g$$

4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL TACO 3

4.1 Metodología para establecer los parámetros geomecánicos de los materiales que conforman la ladera del Taco 3

Los parámetros de resistencia de los depósitos de suelo fueron determinados a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de campo y de laboratorio y corroborados a partir de correlaciones empíricas. Estas correlaciones son muy útiles para confirmar y validar los datos obtenidos en los ensayos geotécnicos realizados, basándose en los resultados de pruebas de penetración estándar y en las propiedades índices de los suelos. A continuación se relacionan las metodologías que serán utilizadas para establecer los parámetros de resistencia al corte de los suelos:

4.1.1 Metodologías a partir de ensayos

- Clasificación: se realiza teniendo en cuenta los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, humedad natural y peso específico.
- Ángulo de fricción y cohesión efectiva: se obtienen de los ensayos de laboratorio compresión triaxial CU.
- Módulo de Deformación: se obtiene a partir de la linealización del modelo hiperbólico de los ensayos triaxiales.

4.1.2 Metodologías a partir de correlaciones empíricas

- Ángulo de fricción y cohesión efectiva: Se determina de acuerdo con los resultados del ensayo de penetración estándar (SPT), basados en la metodología propuesta por Álvaro González (1999).
- Resistencia al corte no drenada: Se determina de acuerdo con los resultados del ensayo de penetración estándar (SPT), basados en las correlaciones de Stroud (1974), Sowers (1954), Terzaghi & Peck (1967), Hara et al (1971).
- Permeabilidades: Se determina a partir de la relación entre el diámetro característico D_{10} y la permeabilidad k propuesta por Lambe (1979).
- Módulo de deformación: se determina con base en los resultados del ensayo de penetración estándar, utilizando las correlaciones de Bowles (1996) para gravas, arenas, limos y arcillas

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

A continuación se describe con mayor detalle las correlaciones empíricas utilizadas para la determinación de los parámetros descritos anteriormente.

4.1.2.1 Ángulo de fricción y cohesión efectiva

Para obtener valores aproximados de los parámetros de cohesión (c') y el ángulo de fricción interna (ϕ') a partir del número de golpes del ensayo SPT, se siguió la metodología planteada por Álvaro González (1999), como se describe a continuación:

- Con los registros de ensayos de laboratorio y campo presentados en el documento de Ariztía y Vicuña (1968) se determinó el valor de N (golpes/pie) en campo, el peso unitario y la posición del nivel freático.
- Se calcularon los esfuerzos totales (σ), la presión de poros (u_w) y los esfuerzos efectivos ($\sigma' = \sigma - u_w$) para toda la columna de ensayo.
- Para el cálculo de la corrección por confinamiento (C_n) se utilizó la formulación de Seed-Idriss (Marcuson, 1978), dado que la variación de la raíz cuadrada de la desviación de esta ecuación matemática, es la que menos se aparta del promedio en comparación con las demás formulaciones propuestas para el cálculo del C_n , que se presentan en el documento de Álvaro González (1999).

Por tanto, se obtuvo el valor de N corregido por confinamiento con la formulación de C_n de Seed-Idriss (Marcuson, 1978).

$$C_n = 1 - k \times \log\left(\frac{\sigma'_v}{p_0}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

σ'_v : Esfuerzo vertical efectivo.

p_0 : Presión atmosférica.

k : Para $\left(\frac{\sigma'_v}{p_0}\right) < 1$ entonces $k = 1,41$, y para $\left(\frac{\sigma'_v}{p_0}\right) \geq 1$ entonces $k = 0,92$.

- Se calculó el valor de la resistencia al corte, así:

$$\tau = \sigma' \times \tan \phi_{eq} \quad \text{Ecuación 2}$$

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

- Para obtener el valor de ϕ'_{eq} se empleó la fórmula de Kishida, dado que es la que menos se aparta del promedio de la variación de la raíz cuadrada de desviación, en comparación con las demás formulaciones descritas para ϕ'_{eq} presentadas en el documento de Álvaro González (1999):

$$\phi'_{eq} = 15 + \sqrt{20 \times N_{72}}$$

Ecuación 3

- Finalmente se determinó el ángulo de fricción interna (ϕ') como el promedio de los valores obtenido de ϕ'_{eq} .

4.1.2.2 Resistencia al corte no drenada (S_u)

La resistencia al corte no drenada de los materiales se determina a partir de correlaciones con el número de golpes del ensayo de penetración estándar SPT, para suelos de plasticidad baja, media y alta. Las ecuaciones utilizadas se presentan en el Cuadro 4-1.

Cuadro 4-1. Relación entre la resistencia al corte no drenada (S_u) y número de golpes (N) del ensayo SPT. (NAVFAC DM-7.1, 1986)

Plasticidad del suelo	Correlación (S_u en kPa)	Fuente
Baja (IP < 20)	4,4 N	Stroud (1974)
	3,75 N	Sowers (1979)
Media (20 ≤ IP < 30)	6,7 N	Terzaghi & Peck (1967)
	7,5 N	Sowers (1979)
Alta (IP > 30)	29,0 N ^{0,72}	Hara et al (1971)
	12,5 N	Sowers (1979)

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

4.1.2.3 Coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad se determina a partir de valores de referencia para suelos granulares, tal y como se muestra en el Cuadro 4-2.

Cuadro 4-2. Relación entre el diámetro característico D_{10} y la permeabilidad k para suelos granulares (Lambe, 1979).

Tipo de suelo	d_{10} [cm]	k [10^{-6} m/s]	$C_1=k/(d_{10})^2$ [$\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$]
Grava gruesa	0.082	1100	16
Grava arenosa	0.02	160	40
Grava fina	0.03	71	8
Grava limosa	0.006	4.6	13
Arena gruesa	0.011	1.1	1
Arena media	0.002	0.29	7
Arena fina	0.003	0.096	1
Limo	0.0006	0.15	42

4.1.2.4 Módulo de deformación E

El módulo de elasticidad E_s se obtiene a partir del número de golpes del ensayo de penetración estándar, tal como se presenta en el Cuadro 4-3.

Cuadro 4-3. Correlaciones empíricas para estimar el módulo de Young E_s en diferentes tipos de suelo a partir del número de golpes (N) del ensayo de SPT.

TIPO DE SUELO	CORRELACIÓN (E_s en kPa)	REFERENCIA
Gravas	$600(N+6)$ $N \leq 15$	Bowles, 1996
	$600(N+6)+2000$ $N > 15$	
Arenas saturadas	$250(N+15)$	Bowles, 1996
Arenas limosas	$1800+270N$ $N \leq 15$	Ten et al, 1991
	$7740+135N$ $N > 15$	
Arenas arcillosas	$320(N+15)$	Bowles, 1996
Limos	$300(N+6)$	Bowles, 1996
Arcillas	Arcilla de alta plasticidad $E = 300 \cdot S_u$	Bowles, 1996
	Arcilla de baja plasticidad $E = 1000 \cdot S_u$ (S_u es la resistencia al corte no drenado)	

4.1.3 Metodología a partir de retro-análisis

El método de retro-análisis se realiza a partir del conocimiento del mecanismo y geometría de la superficie de falla. Este tipo de análisis es de gran utilidad para la caracterización geomécanica de los materiales que conforman la zona en estudio.

Este análisis consiste en determinar a partir de los estudios realizados en campo, los parámetros resistentes del terreno, generalmente pares de valores de cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ'), que cumplen la condición de equilibrio, es decir, con un factor de seguridad mínimo de 1 a lo largo de la superficie de rotura.

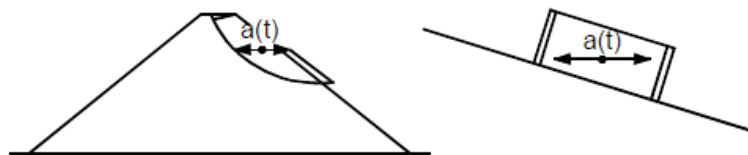
Para la evaluación de los parámetros por medio del retro- análisis se llevaran a cabo análisis de estabilidad en condiciones de deformación plana utilizando el software Slide 6.0 de Rocscience bajo el método de cálculo de equilibrio límite con dovelas, con un criterio de falla regido por la ley Mohr-Coulomb.

4.2 Determinación de la aceleración crítica

El Ingeniero Civil Nathan M. Newmark ideó un sencillo método para estimar el desplazamiento permanente producido por un movimiento sísmico en presas de tierra en 1965. En 1985, Wilson y Keefer realizaron pequeñas modificaciones sobre el método propuesto por Newmark para poder ser aplicado al estudio de laderas naturales. Actualmente, es común su aplicación en estudios de evaluación de la ocurrencia de inestabilidades de ladera desencadenadas por terremotos.

El método del bloque deslizando de Newmark se basa en el concepto de un bloque que desliza sobre una superficie inclinada, el cual está sujeto a una onda sinusoidal y se calcula la aceleración k_y que se requiere para que se exceda el equilibrio estático.

Figura 4-1. Representación esquemática del bloque deslizando (Duncan y Wright 2005)



La mínima aceleración del suelo requerida para superar la máxima resistencia del bloque deslizando se conoce como aceleración crítica (A_c).

La aceleración crítica se calcula mediante el análisis de equilibrio límite. El coeficiente a utilizar es el que produce un factor de seguridad 1.0 en un análisis pseudo-estático.

$$A_c = (FS - 1)g \sin \alpha \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

FS = Factor de seguridad estático del talud.

g = aceleración de la gravedad.

α = ángulo de giro. (Para una falla plana paralela a la cara de la pendiente, este sería el ángulo de la pendiente. Mientras que para una falla circular es el ángulo entre la vertical y el radio de rotación).

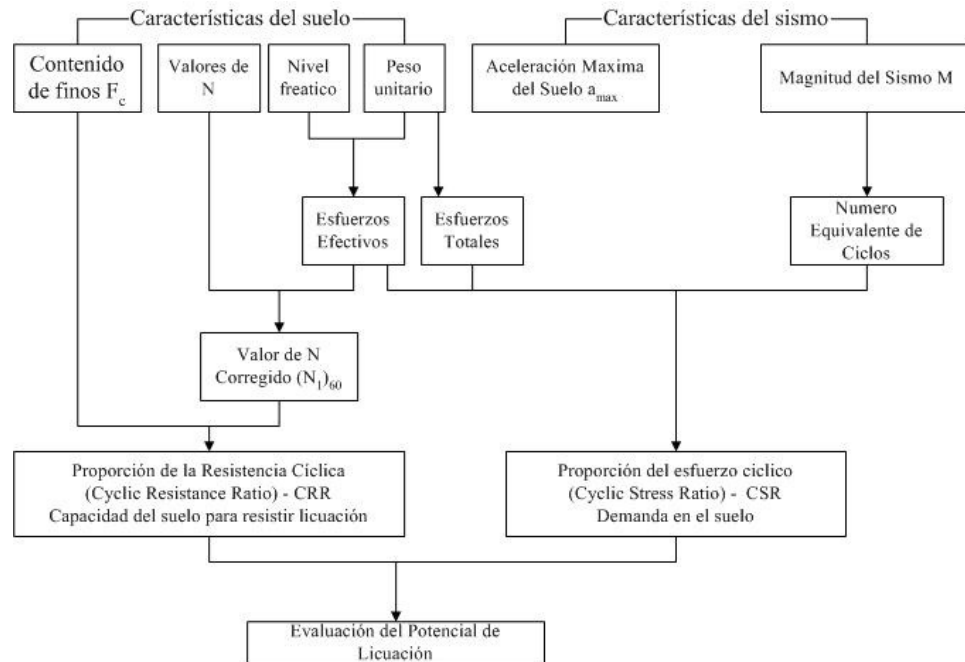
Cuando las aceleraciones de la onda sísmica exceden el valor de A_c , el bloque se mueve, el tiempo restante el bloque permanece en reposo. De esta manera se calcula la deformación acumulada durante todo el sismo. Mediante la integración de las aceleraciones que sobrepasan la aceleración crítica se determinan las velocidad, y con la doble integración, los desplazamientos.

4.3 Análisis de licuación

El fenómeno de licuación produce un cambio en el comportamiento mecánico de los suelos, en el cual el estado sólido del sedimento se transforma a uno líquido. Tal comportamiento se genera por el incremento en la presión de poros producto de la excitación dinámica, que genera la pérdida total o parcial de la resistencia al corte del suelo.

El potencial de licuación de los sedimentos fue evaluado basado en el procedimiento simplificado tradicional determinístico (Seed and Idriss, 1985), incorporando a su vez las recomendaciones del taller organizado por National Center of Earthquake Engineering Research (NCEER) y National Science Foundation (NSF) (Youd et al., 2001). La Figura 4-2 ilustra un diagrama de flujo para la evaluación del potencial de licuación.

Figura 4-2. Diagrama de flujo para la evaluación del potencial de licuación a partir de resultados de ensayos SPT



4.3.1 Parámetros sísmicos

A partir del estudio sísmico presentado en el numeral 3.3, se establecieron los valores máximos de aceleración en la superficie del terreno.

Las fuente sismogénica principal en la zona del Taco 3 es la subducción entre las placas de Nazca y Continental. La aceleración horizontal máxima obtenida para el sismo del 22 de mayo de 1960, de magnitud Ms de 8,5 a partir de la Ley de atenuación propuesta por Crempein (2011) es de $a_{max} = 0,25g$, tal y como se describió en el numeral 3.3.1.

4.3.1.1 Cálculo de esfuerzos cortantes inducidos por sismo

La demanda sísmica sobre el suelo se ha expresado tradicionalmente en términos de la relación de esfuerzo cíclico (CSR) (Seed and Idriss, 1985), como sigue:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} \approx 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

a_{max} = aceleración máxima horizontal generada por el sismo sobre la superficie del terreno.

g = aceleración de la gravedad.

σ_{v0} y σ'_{v0} = esfuerzos totales y efectivos, respectivamente.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

r_d = coeficiente de reducción por esfuerzos. Este último coeficiente tiene en cuenta la flexibilidad del perfil del suelo y se calcula en la práctica como sigue (Youd et al., 2001):

$$\begin{aligned} r_d &= 1 - 0.00765z && \text{para } z \leq 9.15 \text{ m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z && \text{para } 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde,

z = profundidad desde la superficie del terreno.

4.3.2 Evaluación de la resistencia al corte cíclico del depósito de suelo

La resistencia del suelo a carga cíclica se basa en el valor $(N_1)_{60}$ determinado a partir del ensayo de penetración estándar (SPT). El valor $(N_1)_{60}$ es el número de golpes de SPT corregidos por factores de ejecución del ensayo. La normalización por sobrecarga se aplica debido a que los valores N del SPT aumentan con el incremento del esfuerzo efectivo. La normalización se aplica a través de un factor de corrección por incremento de esfuerzos, C_N , que se puede obtener siguiendo la metodología descrita en el numeral 4.1.2.1 del presente documento.

La resistencia del suelo a licuación se cuantifica por medio de la relación de resistencia cíclica, CRR , la cual representa la máxima CSR que el depósito puede resistir a un $(N_1)_{60}$ dado. Para determinar la susceptibilidad a licuación se utiliza una frontera empírica que separa condiciones licuables de aquéllas no licuables (ver Figura 4-3; Youd et al., 2001).

Para efectos de cálculo sistemático, una ecuación que describe la curva de CRR es:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad \text{Ecuación 7}$$

En el trabajo original de Seed et al. (1985) se puede apreciar un aumento de CRR con el aumento en el contenido de finos (FC), el cual ha sido revisado y estandarizado (ver Figura 4-3). Para un suelo dado, el valor $(N_1)_{60}$ se puede corregir para obtener aquél para una arena limpia; las expresiones recomendadas son (Youd et al., 2001):

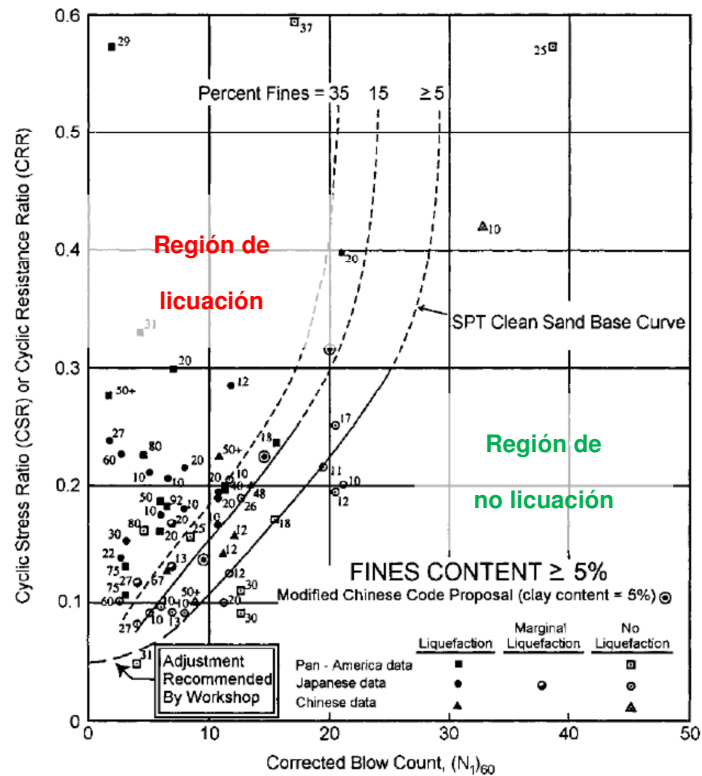
$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad \text{Ecuación 8}$$

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{si } FC \leq 5.0\% \\ e^{\frac{1.76 - 190}{FC^2}}, & \text{si } 5.0\% < FC < 35.0\% \\ 5.0, & \text{si } FC \geq 35.0\% \end{cases} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\beta = \begin{cases} 1, & \text{si } FC \leq 5.0\% \\ 0.99 + \frac{FC^{1.5}}{1000}, & \text{si } 5.0\% < FC < 35.0\% \\ 1.2, & \text{si } FC \geq 35.0\% \end{cases} \quad \text{Ecuación 10}$$

Figura 4-3. Fronteras de susceptibilidad por licuación en función de $(N_1)_{60}$ (Youd et al., 2001).



La frontera de CRR en la Figura 4-3 aplica únicamente para sismos de magnitud $M_w = 7.5$. Para sismos de magnitud diferente, como es el caso del sismo que produjo el deslizamiento del Taco 3, la curva de CRR se debe ajustar a través del factor de escala por magnitud, MSF . El factor está dado por la siguiente expresión (Youd et al., 2001):

$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad \text{Ecuación 11}$$

4.3.3 Evaluación de la probabilidad de licuación

Los métodos de análisis actuales para la evaluación del potencial de licuación se basan en la determinación de un factor de seguridad determinístico, cuyo resultado establece si el fenómeno de licuación puede presentarse o no. En el documento presentado por J.H. Hwang et. al. (2004), titulado "A practical reliability-based method for assessing soil liquefaction potential" para la revista "Soil Dynamics and Earthquake Engineering", se describe un método de análisis de confiabilidad basado en el análisis de licuación propuesto por Seed et. al. (1985). Este método de confiabilidad utiliza la ley de atenuación de aceleración empírica definida en el área de Taiwan para derivar la función de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) y los valores de la relación de esfuerzos cíclicos (CSR) inducido por el terremoto. La función de distribución de densidad de probabilidad (PDF) y las relaciones de resistencia cíclica (CRR), pueden ser deducidas de curvas probabilísticas de resistencia cíclica.

El procedimiento para estimar la probabilidad de licuación, se describe brevemente a continuación y se presenta en la Figura 4-4:

- 1) Con la estimación de los parámetros sísmicos de magnitud (M) y distancia hipocentral (R), se debe estimar la aceleración horizontal máxima derivada de la ley de atenuación. Posteriormente, se debe escalar la magnitud del sismo dado que el método es para un sismo de magnitud de 7,5.
- 2) A partir de los valores de aceleración máxima y la magnitud del sismo escalada se puede determinar los valores CSR.
- 3) Con los datos geológicos del número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT), esfuerzos efectivos, y la corrección por el contenido de finos de cada material se calculan los valores CRR.

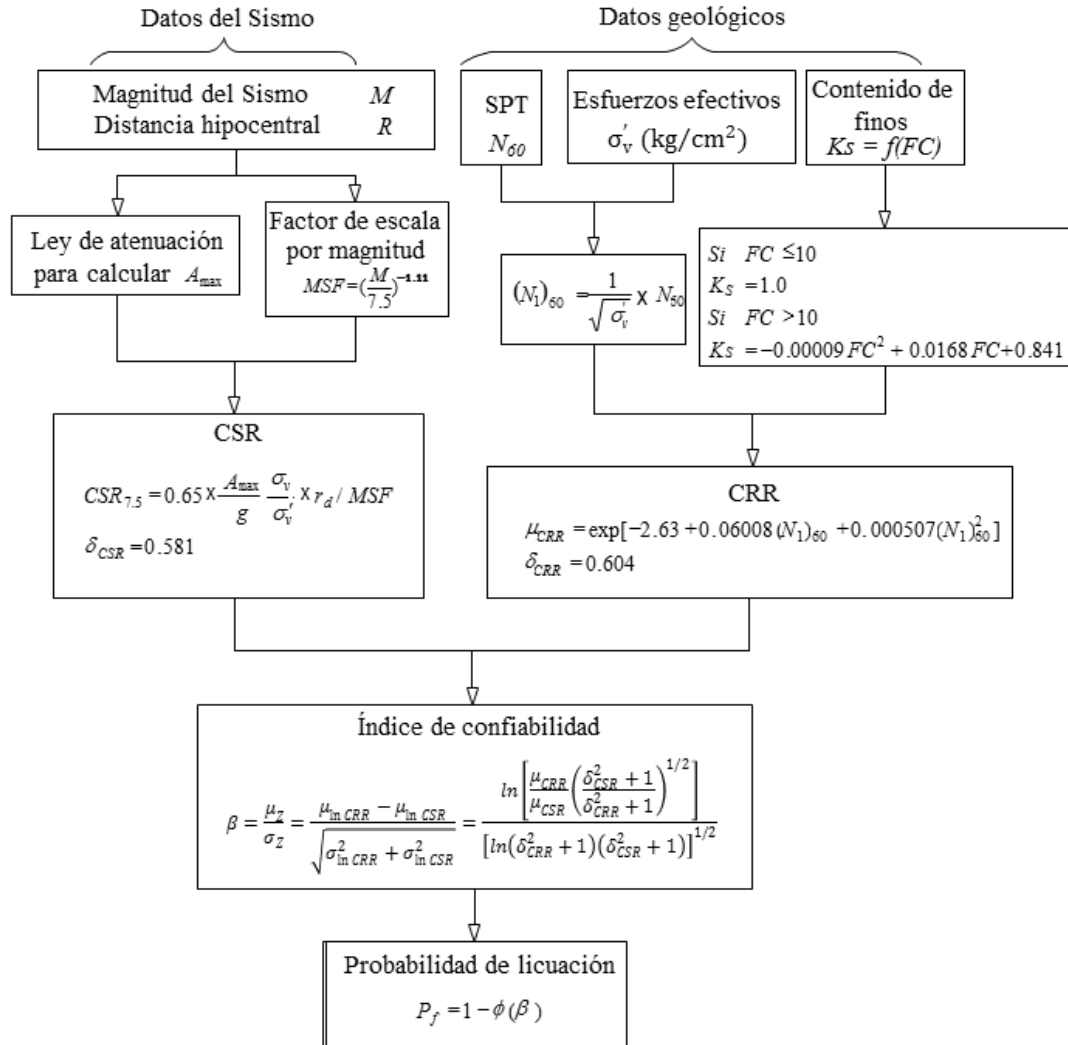
Se debe tener en cuenta que para esta metodología, la corrección de la resistencia a la penetración estándar por el porcentaje de contenido de finos, se realizó para la base de datos del sismo Chi-Chi y otros alrededor del mundo, con cuyos resultados se obtuvieron el valor medio y la desviación estándar para derivar la función de probabilidad CRR. La corrección por el contenido de finos se realizó con las curvas empíricas propuestas por Seed et. al (1985), cuyas ecuaciones se presentan en la Figura 4-4.

- 4) Con la estimación de CSR y CRR se estima el valor de índice de confiabilidad β , definido como el valor inverso de la función normal estándar acumulativa de la probabilidad de falla, el cual mide la confiabilidad de los resultados de la evaluación de licuación.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

- 5) Por último, la probabilidad de licuación es estimada a partir del modelo de distribución log-normal.

Figura 4-4. Diagrama de flujo del método de confiabilidad para la estimación de probabilidad de licuación (Tomado de J.H. Hwang et. al. (2004))



4.4 Análisis de estabilidad

Para la evaluación de la estabilidad de la ladera del Taco 3 se utilizarán los programas SLOPE/W[®] y QUAKE/W[®] del paquete GeoStudio[®], con los cuales se evaluarán las condiciones estáticas y dinámicas del Taco 3. A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los programas:

4.4.1 Descripción del software SLOPE/W 2007[®]

SLOPE/W[®] es un software diseñado para el análisis y cálculo de la estabilidad de taludes en suelo o roca. Con SLOPE/W[®] se puede variar las formas de las superficies de falla, las condiciones de presión de poros, las propiedades del suelo, los métodos de análisis y las condiciones de carga.

Usando la formulación de equilibrio límite, SLOPE/W[®] puede modelar suelos heterogéneos, estratigrafías complejas y diferentes geometrías de superficie de falla, variando las condiciones de presión de poros. Los análisis de estabilidad pueden ser desarrollados usando parámetros de entrada probabilísticos o determinísticos, sea el caso. Los esfuerzos calculados a través del método de los elementos finitos pueden ser usados en los cálculos de estabilidad a partir de las formulaciones de equilibrio límite para obtener un análisis más detallado.

Igual que SEEP/W[®], SIGMA[®] y QUAKE/W[®], SLOPE/W[®] usa regiones y líneas para definir las capas de los diferentes materiales a modelar dependiendo del problema. Además de poder seleccionar el método de análisis, también el usuario podrá especificar las propiedades de los materiales y las condiciones de presión de poros, definir cargas de refuerzo (tales como, el uso de geosintéticos, pilotes, anclajes, etc.) y crear superficies posibles de falla.

Con este programa se calculará el Factor de Seguridad dinámico tomando como datos de entrada los esfuerzos, presiones de poros y aceleraciones obtenidas a lo largo del tiempo con el programa QUAKE/W[®].

4.4.2 Descripción del software QUAKE/W 2007[®]

QUAKE/W[®] es un software geotécnico basado en el método de los elementos finitos (FEM) usado para el análisis dinámico de estructuras térreas sometidas a la acción de movimientos telúricos (sismos) o fuerzas puntuales dinámicas producto de una carga explosiva o de un impacto repentino. Este software permite determinar el movimiento y el exceso de presión de poros que surge debido a la excitación dinámica.

El software cuenta internamente con funciones de caracterización que son usadas principalmente para establecer propiedades a los materiales permitiendo al usuario poder usar datos obtenidos en laboratorio o en la literatura. Pueden ser usados tres modelos constitutivos diferentes:

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

- Modelo Elástico Lineal
- Modelo Elástico Equivalente
- Modelo de Tensiones Efectivas No-Lineal.

Para el análisis dinámico, QUAKE/W[®] usa el método de integración directa para calcular los desplazamientos nodales y el exceso de presión de poros que surgen de las fuerzas inerciales en pasos de tiempo definidos por el usuario.

Igual que un modelo en SEEP/W[®] será construido definiendo una geometría inicial del problema, QUAKE/W[®] también puede ser usado para definir la geometría inicial del problema y a la cual son definidas ciertas regiones las cuales constituyen e identifican cada una de las capas o niveles para cada suelo o material. Gráficamente son aplicadas las condiciones de contorno al modelo y se especifican las propiedades de los materiales. Tanto las propiedades de los materiales, la señal que produce el sismo, las condiciones de contorno y elementos estructurales adicionales, pueden ser instalados en cualquier modelo.

Una vez realizado el análisis, QUAKE/W[®] también ofrece una herramienta de visualización gráfica de resultados. El software genera gráficas X-Y o contornos de distribución, para cualquier parámetro calculado dentro del análisis, como es el caso de esfuerzos, deformaciones, presión de poros, aceleraciones, entre otros parámetros. El software también permite verificar las zonas donde se presenta licuación. Todos los resultados podrán ser exportados a Microsoft[®] Excel[®] para modificaciones o análisis más concretos.

Con este programa se calcularán los esfuerzos, presiones de poros y aceleraciones obtenidas a lo largo del tiempo bajo la acción del sismo de diseño.

4.5 Análisis de flujo subsuperficial

Mediante análisis de redes de flujo se buscará establecer el nivel de agua a través de la ladera del Taco 3, para lo cual se establecerán las condiciones de borde. Posteriormente, se realizará el análisis de flujo variable donde se evaluarán diferentes condiciones en el tiempo, con el cual se obtendrá el nivel freático que actúa sobre la ladera por el represamiento del río San Pedro.

Para el estudio del régimen de flujo existente en el cuerpo de la ladera del Taco 3 tanto en la fase previa al deslizamiento como en la etapa post deslizamiento y evaluación de diferentes incrementos en el nivel del río San Pedro, se empleará el programa de elementos finitos SEEP/W[®] del paquete GeoStudio[®]. A continuación se presenta una breve descripción de este programa:

4.5.1 Descripción del software SEEP/W 2007®

SEEP/W® es un software fundamentado en el método de los elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés), para modelos de geometrías bidimensionales. Su formulación permite considerar análisis para diferentes problemas incluyendo problemas saturados en el estado “Steady – State” (Flujo Estacionario o de equilibrio), hasta problemas de flujo saturado-no saturado con dependencia del tiempo (Análisis Transitorio).

El programa SEEP/W® resuelve la ecuación de Richards mediante el método de Galerkin aplicado a una malla de elementos finitos.

Un modelo en SEEP/W® será construido definiendo una geometría inicial del problema a la cual se le asignan regiones que a su vez constituyen e identifican las capas o estratos para cada suelo. Gráficamente son aplicadas las condiciones de contorno al modelo y se especifican las propiedades de los materiales. Las propiedades de los materiales serán estimadas a partir de la medición de parámetros de granulometría, la conductividad hidráulica del medio saturado, el contenido de agua del medio saturado y/o del valor de entrada de aire.

Una vez realizado el análisis, SEEP/W®, ofrece una herramienta de visualización gráfica de resultados. El software genera gráficas X-Y o contornos de distribución para cualquier parámetro computado dentro de los análisis, tales como cabeza hidrostática, presión, gradiente hidráulico, velocidad y conductividad.

4.6 Análisis de esfuerzos y deformaciones por elementos finitos

El método de los elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés) es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. La medula de este método se sustenta en los modelos constitutivos.

En el presente trabajo para evaluar el comportamiento de esfuerzo y deformación de los limos lacustres, se utilizará el modelo hiperbólico planteado por Duncan et al (1980), para posteriormente evaluar el módulo tangente inicial en función del esfuerzo de confinamiento mediante el método de Jambu.

Evaluación del módulo de elasticidad a partir del modelo hiperbólico de Duncan

El comportamiento esfuerzo-deformación propuesto por Duncan et al (1980) tiene una respuesta no lineal con el nivel de esfuerzo siguiendo el comportamiento de un material que endurece por deformación.

La curva esfuerzo-deformación presentada, se puede aproximar a una hipérbola del tipo:

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}} \quad \text{Ecuación 12}$$

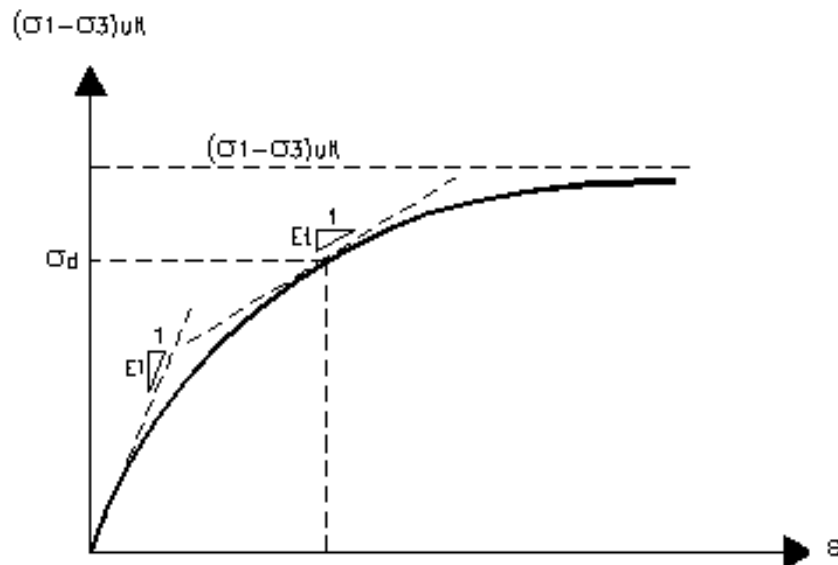
Donde,

E_i = módulo de Young tangente inicial.

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ = Valor asintótico para la curva esfuerzo-deformación.

ε = Deformación unitaria.

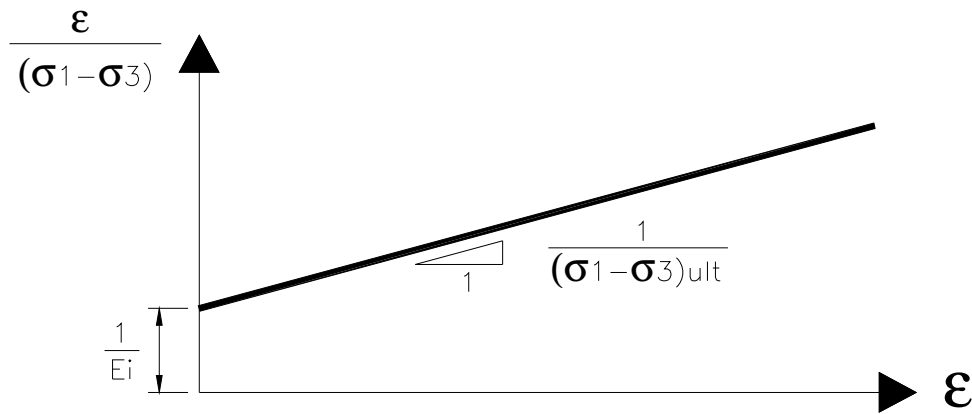
Figura 4-5. Curva de esfuerzo – deformación para el modelo hiperbólico



Si se hace la siguiente linealización a la Ecuación 11, se tiene:

$$\frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Figura 4-6. Curva de deformación normalizada en función al esfuerzo de confinamiento



De esta manera, el módulo de elasticidad inicial y la resistencia última pueden calcularse con una regresión lineal.

Cálculo del módulo tangente en función del esfuerzo de confinamiento

El módulo tangente es una función del esfuerzo de confinamiento. Tal dependencia se puede manifestar mediante la ecuación de Jambu que tiene la siguiente forma:

$$E_i = k \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde,

k : Número de módulo

n : Módulo exponente

P_a : Presión atmosférica (101,3 kPa).

Análisis de esfuerzos y deformaciones

El análisis de esfuerzos y deformaciones se realizará por medio del programa SIGMA/W[®]. Este análisis permitirá conocer con más detalle la variación tanto de esfuerzos efectivos en las direcciones X, Y, así como las deformaciones. Las magnitudes tanto de esfuerzos efectivos como de desplazamientos para la sección del Taco 3 en su condición antes del deslizamiento hasta las condiciones con el cambio del nivel del río San Pedro, se presentan en gráficos de iso-contornos.

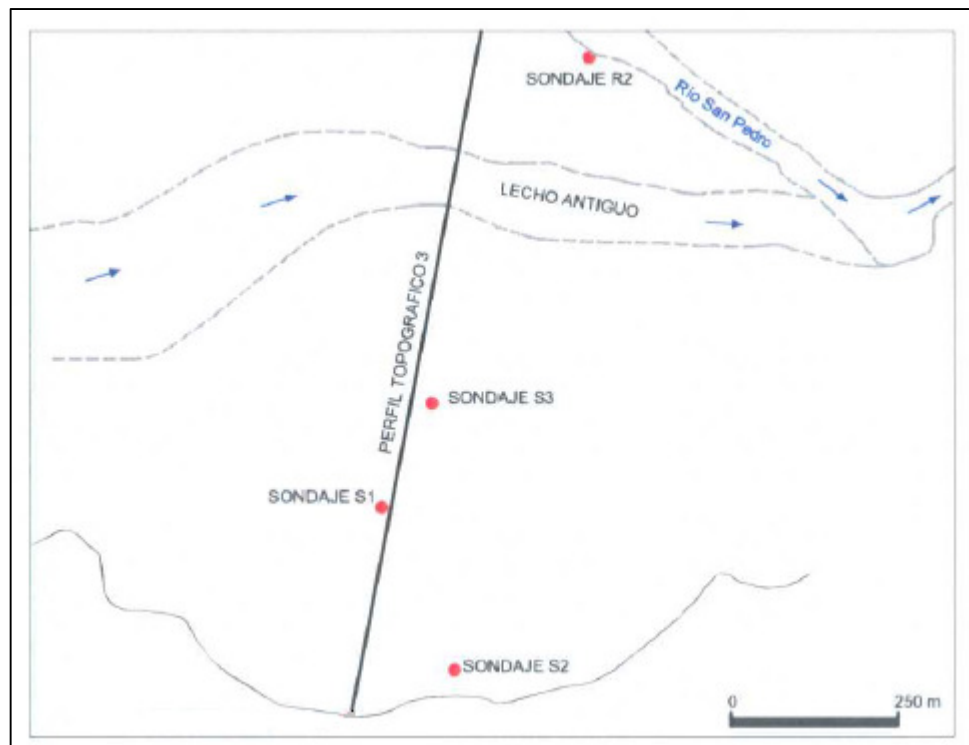
5. ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN NATURAL DEL TACO 3

5.1 Caracterización geotécnica

Durante los años 1961 y 1968, se efectuaron trabajos de exploraciones geotécnicas en la zona de deslizamiento del Taco 3, con el fin de determinar las propiedades mecánicas de los materiales existentes en la zona y la localización de la superficie de deslizamiento. El trabajo de Endesa se realizó durante el año 1961 y consistió en la ejecución de dos perforaciones (R1 y R2), mientras que el IDIEM ejecutó las tres perforaciones (S1, S2 y S3) durante el año 1968.

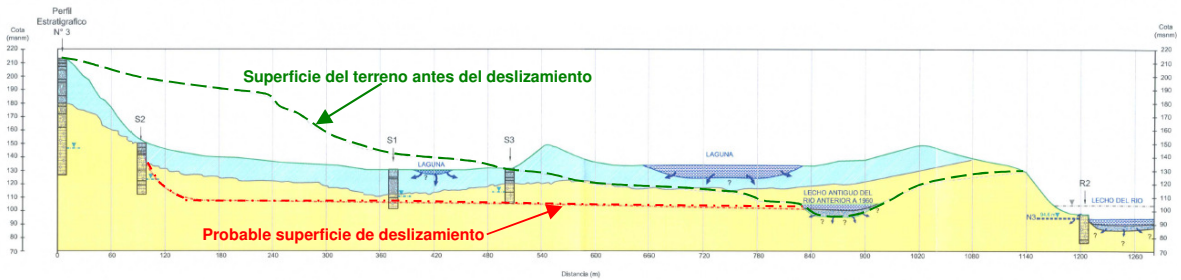
En la Figura 5-1 se presenta la planta y en la Figura 5-2 el perfil longitudinal de la localización de las exploraciones geotécnicas realizadas sobre la ladera en estudio.

Figura 5-1. Localización en planta de las exploraciones ejecutadas sobre el Taco 3. (Tomada de Ariztía y Vicuña (1968))



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 5-2. Perfil topográfico 3. (Modificada de Ariztía y Vicuña (1968)).



De las exploraciones geotécnicas realizadas, la perforación S2 es la única que se encuentra localizada sobre la base del escarpe principal y en la cual se pueden identificar los materiales existentes originalmente antes del deslizamiento del Taco 3. Sin embargo, como se observa en la Figura 5-2 la cota de la perforación S2 se encuentra aproximadamente a 68 m de profundidad de la superficie del terreno natural antes del deslizamiento del 22 de Mayo de 1960.

Por lo tanto, para la caracterización de este material removido y considerando la descripción de los materiales encontrados después del deslizamiento, se dedujo que las propiedades mecánicas para este material serían las mismas que las definidas para el primer estrato evaluado a partir de la perforación S2. Bajo las consideraciones anteriores la perforación S2 se escogió como insumo básico para establecer la estratigrafía y propiedades de los materiales que conforman la ladera del Taco 3.

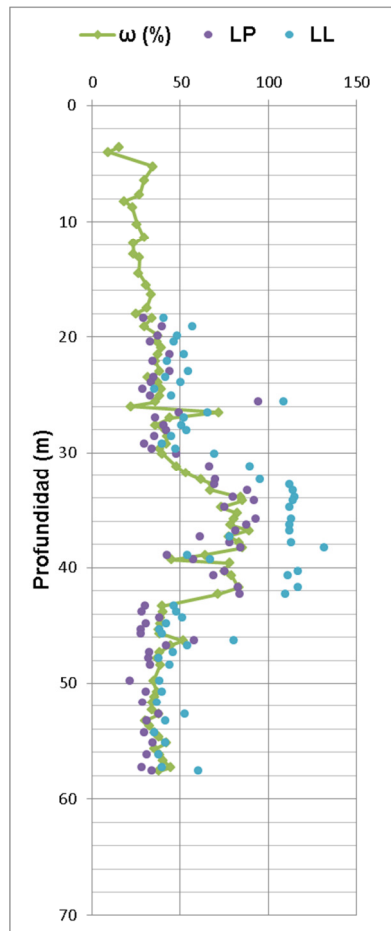
A partir de los estudios de laboratorio y de campo realizados sobre las muestras obtenidas de la perforación S2 se definieron las propiedades índices de cada material y se estableció el perfil estratigráfico de la ladera del Taco 3 antes de la ocurrencia de los movimientos de tierra del 22 de Mayo de 1960.

5.1.1 Propiedades índice

Para la determinación de las propiedades índice de los materiales, tal como la humedad natural, peso específico, límites de Atterberg o plasticidad y granulometría, se tomaron los estudios de investigación geotécnica realizada por Ariztía y Vicuña (1968). Esta información se digitalizó, con el fin de detallar los cambios de las propiedades en cada material y para posteriormente diferenciar cada estrato y establecer el modelo geológico del Taco 3.

Los resultados de los ensayos de laboratorio de clasificación realizados sobre las muestras obtenidas de la perforación S2 se presentan en la Figura 5-3. Se debe tener en cuenta que las profundidades que se indican en la siguiente figura son tomadas en referencia a la cota de la perforación S2.

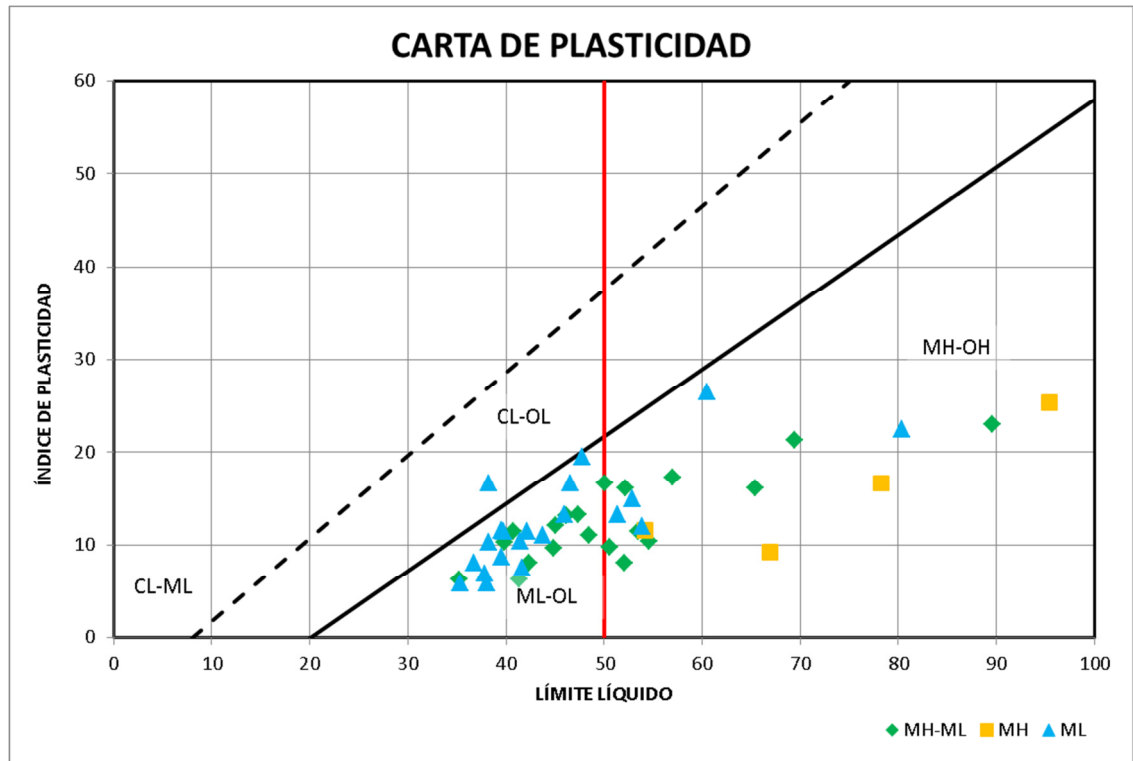
Figura 5-3. Resultados de ensayos de humedad natural y límites de Atterberg – Perforación S2.



De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio, se puede deducir que el suelo se encuentra en un estado semi-sólido, dado que la humedad natural que presenta se encuentra en cercanías al límite plástico o con valores por debajo a este.

Posteriormente se clasificaron los materiales del Taco 3 con la ayuda de la carta de Casagrande, como se muestra en la Figura 5-4.

Figura 5-4. Clasificación de los materiales mediante la Carta de Casagrande.



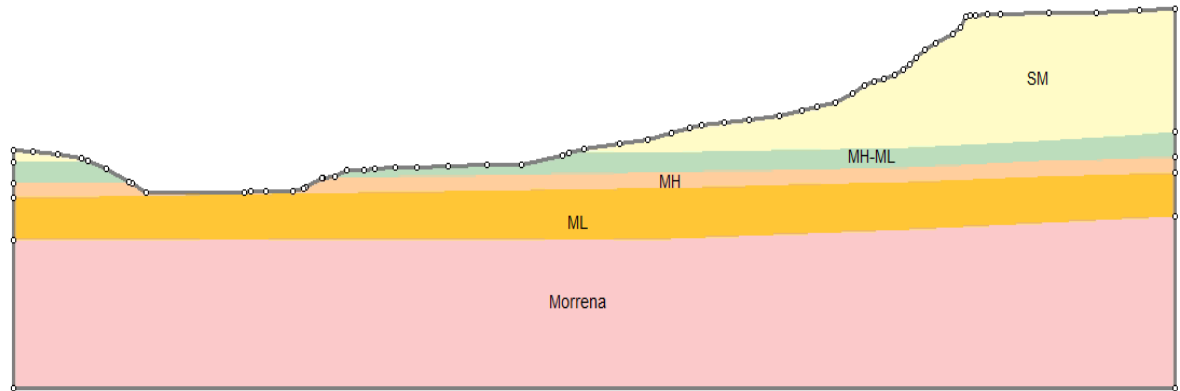
A partir de la Figura 5-4, la descripción litológica, el análisis de los estudios realizados sobre el Taco 3 y en base a las profundidades tomadas desde la superficie del terreno antes del deslizamiento de 1960 (véase Figura 5-2), se definió el modelo geológico que se describe a continuación:

- Entre 0 a 80 metros de profundidad: Arenas limosas con algo de gravas dispersas. (SM).
- De 80 a 96 metros de profundidad: Alternación de limos de alta y baja plasticidad, de color gris claro y oscuro. (MH-ML).
- De 96 a 106 metros de profundidad: Limos plásticos con estratificaciones delgadas de arenas orientadas horizontalmente y a 45°, de color gris verdoso. (MH)
- De 106 a 122 metros de profundidad: Limos poco plásticos color gris claro y oscuro. (ML).
- Desde los 122 metros de profundidad: Morrena glacial compuesta por grava en matriz de arena gruesa. (Morrena).

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

El modelo geológico obtenido para la condición natural de la ladera del Taco 3, se presenta en la Figura 5-5.

Figura 5-5. Modelo geológico de la ladera antes del deslizamiento.



La descripción litológica y el resumen de ensayos de laboratorio de las exploraciones de campo se presentan en el Anexo A.

5.1.2 Parámetros de deformabilidad

El módulo de elasticidad de Young (E_s) para los estratos de arena y de la morrena se estimaron a partir de correlaciones empíricas tal y como se describió en el numeral 4.1.2.4.

Con los datos de los ensayos triaxiales realizados en las muestras de los estratos de limo se estimó el módulo tangencial E_i para la definición del modelo hiperbólico de Duncan et al (1980), que fue seleccionado como modelo constitutivo para los análisis de esfuerzo y deformación pertinentes. Como característica principal del modelo se tiene que el módulo de elasticidad tangencial E_t varía con la presión de confinamiento que posee el material en estudio, tal como se describe en el numeral 4.6.

Los valores de las constantes k (número de módulo) y n (módulo exponente), de la función de esfuerzo y confinamiento para cada estrato de limo se presentan en el Cuadro 5-1.

Cuadro 5-1. Valores de las constantes k y n de la función de esfuerzo y confinamiento para la estimación del módulo tangente inicial E_i

Estrato	Muestra	σ_3 (MPa)	k	n
MH-ML	M-6	0,6	305,43	1,29
	M-10	0,25		
	M-11	0,25		
MH	M-2	0,445	827,83	0,24
	M-9	0,5		
	M-12	0,1		
ML	M-1	0,2	553,4	0,5
	M-3	0,445		
	M-4	0,445		
	M-5	0,6		
	M-7	0,6		
	M-8	0,5		

5.1.3 Parámetros de permeabilidad

Se estimó el parámetro de permeabilidad K para cada material con el fin de determinar las líneas equipotenciales y nivel freático dentro del modelo de la ladera del Taco 3.

Para la estimación de este parámetro para los estratos de arena y de la morrena se utilizaron las correlaciones empíricas descritas en el numeral 0. Para los estratos de limo la permeabilidad se definió de acuerdo con la ecuación de Allen-Hazen a partir del tamaño efectivo D_{10} , y los trabajos de Terzagui & Ralph (1973).

$$k = C_1 \times D_{10}^2 \times (0,7 + 0,03 t) \quad \text{cm/s}$$

Donde,

$$C_1 = C_0 \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2$$

n : porosidad = 0,54

C_0 : coeficiente que depende del suelo

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Tenemos que el coeficiente de permeabilidad para los limos es igual a:

C_0	$D_{10}(\text{cm})$	t	$K (\text{cm/s})$
50	0,0006	10	5,04E-06

El resumen de los parámetros de permeabilidad de cada material se presenta en el Cuadro 5-2.

Cuadro 5-2. Coeficiente de permeabilidad de los materiales que conforman el Taco3.

Material	Descripción	k ($\times 10^{-6}$ m/s)
SM	Arenas limosas con algo de gravas dispersas	1,1
MH-ML	Alternación de limos de alta y baja plasticidad, de color gris claro y oscuro	5,04
MH	Limos plásticos con estratificaciones delgadas de arenas orientadas horizontalmente y a 45°, de color gris verdoso	5,04
ML	Limos poco plásticos color gris claro y oscuro	0,15
Morrena	Morrena glaciar compuesta por grava en matriz de arena gruesa	0,29

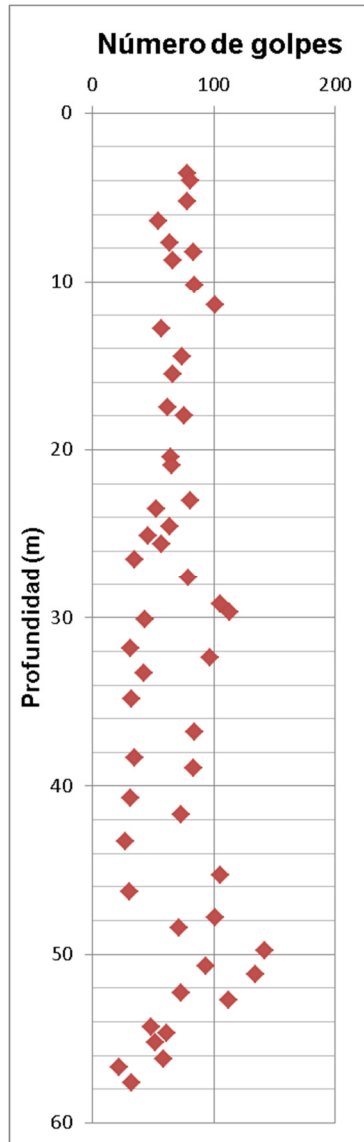
5.1.4 Parámetros de resistencia al corte

La determinación de los parámetros de resistencia al corte de los materiales que conforman la ladera del Taco 3 se desarrolló en dos etapas. La primera etapa consistió en estimar los parámetros de resistencia al corte drenado y no drenado empleando correlaciones empíricas a partir de los resultados de ensayos de penetración estándar SPT, y para la segunda etapa se realizó un retro análisis en el cual se tuvo en cuenta la superficie de deslizamiento planteada por Ariztía y Vicuña (1968) y otras superficies encontradas por el programa Slide® de Rocscience.

5.1.4.1 Estimación de parámetros de resistencia al corte a partir de correlaciones empíricas

Durante la ejecución de las perforaciones IDIEM ejecutó ensayos de penetración estándar (SPT) a diferentes profundidades, cuyos resultados se presentan en el documento realizado por Ariztía y Vicuña (1968). Con el fin de determinar los parámetros de resistencia al corte de los estratos que conforman la ladera del Taco 3 con ayuda de correlaciones empíricas con los valores del número de golpes del ensayo SPT, se realizó la digitalización de los datos y se presentan en la Figura 5-6.

Figura 5-6. Resultados del número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT)



Resistencia al corte no drenada

La resistencia al corte no drenada de los materiales se determinó a partir de correlaciones con el número de golpes del ensayo de penetración estándar SPT, como se describió en el numeral 4.1.2.2.

El resumen de los valores de resistencia al corte no drenada para cada estrato se presenta en el Cuadro 5-3.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Cuadro 5-3. Valores del parámetro de resistencia al corte no drenada (S_u) de los materiales que conforman el Taco 3.

Material	Descripción	S_u (KPa)
SM	Arenas limosas con algo de gravas dispersas	-
MH-ML	Alternación de limos de alta y baja plasticidad, de color gris claro y oscuro	80
MH	Limos plásticos con estratificaciones delgadas de arenas orientadas horizontalmente y a 45°, de color gris verdoso	120
ML	Limos poco plásticos color gris claro y oscuro	60
Morrena	Morrena glaciaria compuesta por grava en matriz de arena gruesa	-

Resistencia al corte en condición drenada (parámetros c' y ϕ')

Para obtener valores aproximados del ángulo de fricción interna (ϕ') a partir del número de golpes del ensayo SPT, se siguió la metodología de Álvaro González (1999) descrita en el numeral 4.1.2.1. Los cálculos realizados se presentan en el Cuadro 5-4.

Cuadro 5-4. Cálculo del ángulo de fricción a partir correlaciones empíricas con los valores del número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT)

Estrato	Profundidad (m)			N	Nreal	NF	γ (Ton/m ³)	σ_v' (Ton/m ²)	C_n	N_{corr}	ϕ'_{eq}
	de	a	media								
Arena	3,33	3,78	3,55	78,40	78	25	1,90	6,75	1,24	60	42,39
	3,78	4,22	4,00	80,80	80	25	1,90	7,59	1,17	59	42,16
	4,22	5,47	4,84	78,60	78	25	1,90	9,20	1,05	51	40,25
	5,47	6,62	6,04	54,80	54	25	1,90	11,48	0,94	32	35,00
	6,62	7,91	7,26	64,20	64	25	1,90	13,79	0,87	34	35,62
	7,91	8,44	8,17	83,60	83	25	1,90	15,52	0,82	43	38,18
	8,44	8,96	8,69	66,70	66	25	1,90	16,52	0,80	33	35,31
	8,96	10,43	9,69	84,40	84	25	1,90	18,41	0,76	39	37,08
	10,43	11,63	11,02	101,00	R	25	1,90	20,95	0,70	44	38,45
	11,63	13,03	12,32	56,60	56	25	1,90	23,42	0,66	23	31,96
	13,03	14,73	13,87	73,80	73	25	1,90	26,36	0,61	28	33,71
14,73	15,73	15,22	66,30	66	25	1,90	28,93	0,58	23	31,96	
MH • ML	15,73	17,73	16,72	61,80	61	25	1,68	31,56	0,54	20	30,81

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Estrato	Profundidad (m)			N	Nreal	NF	Y (Ton/m ³)	σ'_v (Ton/m ²)	C _n	N _{corr}	Φ'_{eq}
	17,73	18,23	17,97	76,00	76	25	1,68	33,66	0,52	24	32,32
	18,23	20,63	19,42	64,50	64	25	1,68	36,09	0,49	19	30,41
	20,63	21,13	20,87	65,10	65	25	1,68	38,53	0,46	18	30,00
	21,13	23,23	22,17	80,60	80	25	1,68	40,71	0,44	22	31,58
	23,23	23,73	23,47	53,10	53	25	1,68	42,90	0,42	13	27,75
	23,73	24,73	24,22	63,80	63	25	1,68	44,16	0,41	16	29,14
	24,73	25,33	25,02	45,60	45	25	1,68	45,48	0,39	11	26,73
	25,33	25,83	25,57	57,40	57	25	1,68	45,85	0,39	14	28,23
	25,83	26,73	26,27	35,20	35	25	1,68	46,33	0,39	8	25,00
	26,73	27,83	27,27	79,40	79	25	1,68	47,01	0,38	18	30,00
	27,83	29,43	28,62	105,00	R	25	1,68	47,92	0,37	24	32,32
	29,43	29,93	29,67	113,00	R	25	1,68	48,64	0,37	25	32,68
	29,93	30,33	30,12	43,30	43	25	1,68	48,94	0,37	9	25,61
	30,33	32,03	31,17	31,70	31	25	1,68	49,66	0,36	7	24,35
	MH	32,03	32,63	32,32	96,90	96	25	1,73	50,46	0,35	21
32,63		33,53	33,07	42,40	42	25	1,73	51,00	0,35	9	25,61
33,53		35,03	34,27	32,60	32	25	1,73	51,88	0,34	6	23,66
35,03		37,03	36,02	83,90	83	25	1,73	53,16	0,33	17	29,58
37,03		38,53	37,77	35,30	35	25	1,73	54,43	0,32	7	24,35
38,53		39,13	38,82	83,60	83	25	1,73	55,20	0,32	16	29,14
39,13		40,93	40,02	31,50	31	25	1,73	56,08	0,31	6	23,66
40,93		41,93	41,42	73,30	73	25	1,73	57,10	0,30	13	27,75
ML	41,93	43,53	42,72	27,60	27	25	1,53	57,89	0,30	5	22,91
	43,53	45,53	44,52	105,00	R	25	1,53	58,84	0,29	19	30,41
	45,53	46,53	46,02	31,00	31	25	1,53	59,64	0,29	5	22,91
	46,53	48,03	47,27	101,00	R	25	1,53	60,30	0,28	17	29,58
	48,03	48,63	48,32	71,70	71	25	1,53	60,86	0,28	12	27,25
	48,63	50,03	49,32	142,00	R	25	1,53	61,39	0,27	24	32,32
	50,03	50,93	50,47	93,10	93	25	1,53	62,00	0,27	15	28,69
	50,93	51,43	51,17	134,00	R	25	1,53	62,37	0,27	22	31,58
	51,43	52,53	51,97	73,30	73	25	1,53	62,79	0,27	12	27,25
	52,53	52,93	52,72	112,00	R	25	1,53	63,19	0,26	18	30,00
	52,93	54,53	53,72	48,30	48	25	1,53	63,72	0,26	7	24,35
	54,53	54,93	54,72	61,30	61	25	1,53	64,25	0,26	9	25,61
	54,93	55,43	55,17	51,90	51	25	1,53	64,49	0,26	8	25,00
	55,43	56,43	55,92	58,50	58	25	1,53	64,88	0,25	9	25,61
	56,43	56,93	56,67	22,20	22	25	1,53	65,28	0,25	3	21,12
56,93	58	57,46	32,20	32	25	1,53	65,70	0,25	4	22,07	

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Los valores del número de golpes presentados anteriormente se obtuvieron de los ensayos de campo realizados en la perforación S-2; por lo tanto, las profundidades de cada estrato y el nivel freático mostrados en el cuadro anterior tienen como nivel de referencia la cota del terreno de la perforación S-2.

En cuanto al parámetro de cohesión para los limos lacustres que constituyen la ladera se trataron como suelos granulares con un valor de c' igual a cero, dado que su contenido de finos se encuentra por debajo del 10%.

El resumen de los valores de resistencia al corte drenada para cada estrato se presenta en el Cuadro 5-5.

Resumen de los parámetros geotécnicos obtenidos para cada estrato

Los valores obtenidos de resistencia al corte no drenada y drenada para cada estrato del Taco 3, se presentan en el Cuadro 5-5. Los parámetros de resistencia al corte de la morrena se determinaron a partir de la caracterización de estos materiales en estudios anteriores.

Cuadro 5-5. Parámetros de resistencia al corte para los estratos del Taco 3

Material	Descripción	γ (kN/m³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Su (kPa)
SM	Arena limosa con algo de gravas dispersas	19,0	0	37	-
MH-ML	Alternación de limos de alta y baja plasticidad de color gris claro a oscuro	16,8	0	29	80
MH	Limos plásticos con estratificaciones delgadas de arenas orientadas horizontalmente y a 45°, de color gris verdoso.	17,3	0	27	120
ML	Limos poco plásticos color gris claro y oscuro.	15,3	0	27	60
Morrena	Morrena glacial compuesta por grava en matriz de arena gruesa.	24,0	700	30	-

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

5.1.4.2 Estimación de parámetros de resistencia al corte aplicando el método de retroanálisis

La estimación de los parámetros al corte por medio de retroanálisis se desarrolló por medio de simulaciones de equilibrio límite en condiciones pseudo-estáticas para un factor de seguridad igual a 1.

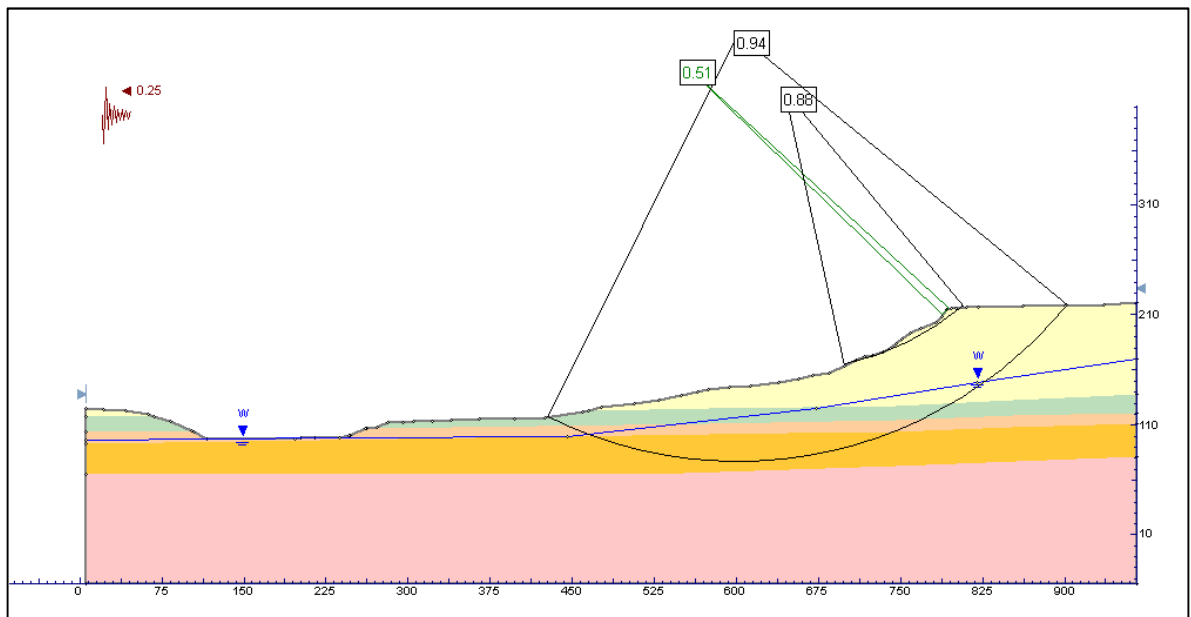
Para la ejecución de estos análisis se consideró un coeficiente de aceleración máxima del terreno de 0,25g, calculada a partir de la ley de atenuación descrita en el numeral 3.3.1.

Análisis pseudo-estático con la superficie originada por el programa Slide

A partir de la definición de los parámetros de resistencia para cada uno de los materiales que se presentaron en el Cuadro 5-5, se realizó la modelación en el programa SLIDE (Stability Analysis for Soils and Rock Slopes) V6.0 de Rocscience bajo el método de cálculo de equilibrio límite con dovelas, con un criterio de falla regido por la ley Mohr-Coulomb y mecanismo de fallas circulares.

En la Figura 5-7 se presenta la superficie de falla analizada y el factor de seguridad obtenido.

Figura 5-7. Sección de análisis del Taco 3 con mecanismo de falla circular



Como se observa en la figura anterior el mecanismo de falla arrojado por el programa con un factor de seguridad mínimo global de 0,51 describe un descascarimiento del estrato de arena, al igual que el mecanismo de falla de factor de seguridad de 0,88 con una profundidad de aproximadamente 7 m. Se resalta

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

que estas dos superficies no describen el mecanismo que se generó sobre el Taco 3 debido al sismo del 22 de mayo de 1960.

De acuerdo a lo anterior se buscó una superficie de falla que describiera un mecanismo de falla más real; sin embargo, se observa que el mecanismo de falla con factor de seguridad de 0,94 queda colgado sobre el estrato suprayacente a los limos lacustres. Al observar que la verdadera superficie de deslizamiento se originó principalmente por los estratos de limo se descartó el análisis por medio de superficies circulares arrojadas por el programa, ya que se aleja del mecanismo real de falla ocurrido en 1960.

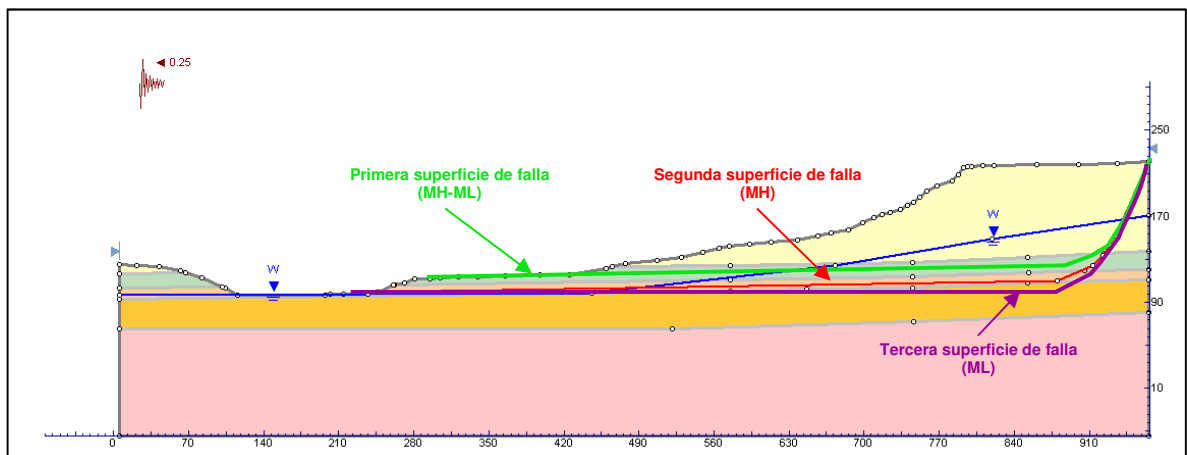
Análisis pseudo-estático con la superficie de deslizamiento propuesta

Como se mencionó anteriormente, en el estudio realizado por Ariztía y Vicuña (1968) se dedujo que la superficie de deslizamiento se desarrolló por los limos lacustres presentes en la ladera del Taco 3. Sin embargo, dada la dificultad de precisar por cual estrato de los limos se generó la falla, se consideró el desplazar la superficie de falla por cada uno de estos estratos (MH-ML, MH y ML).

Al igual que el modelo con mecanismo de fallas circulares, el actual análisis se modeló con el programa SLIDE V6.0 de Rocsciense. Para el análisis pseudo-estático se consideró un coeficiente de aceleración horizontal de 0,25g.

En la Figura 5-8 se presenta el modelo geológico con la superficie de deslizamiento propuesta.

Figura 5-8. Sección de análisis del Taco 3 con el mecanismo definido por Ariztía y Vicuña (1968)



Condiciones no drenadas

El análisis en condiciones no drenadas se evaluó considerando que durante el evento sísmico los materiales que conforman la ladera pudieron presentar este tipo de condición. Un análisis no drenado es necesario, dado que uno de los objetivos del presente trabajo es el de determinar cuáles fueron las condiciones originales de la falla y así poder concluir de manera certera la causa que generó el mega deslizamiento en el Taco 3.

Los parámetros establecidos para cada material se asignaron con base en los resultados obtenidos de las correlaciones empíricas presentadas en el numeral 5.1.4.1.

Con la definición de los parámetros de resistencia al corte no drenado de cada uno de los materiales que conforman la ladera del Taco 3 (véase Cuadro 5-5), se procedió a ejecutar el retro-análisis con la localización de la superficie de deslizamiento en cada uno de los estratos de limo presentados anteriormente.

Los resultados de factor de seguridad obtenidos para cada análisis bajo condición seudo-estática se resumen en el Cuadro 5-6.

Cuadro 5-6. Factores de seguridad obtenidos en condición seudo-estática – no drenado

Localización superficie de deslizamiento	Factor de seguridad
MH-ML	0,33
MH	0,42
ML	0,21

Como se observa en el cuadro anterior los valores de factor de seguridad obtenidos son muy bajos, por lo tanto, se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de determinar los parámetros de resistencia al corte para los cuales el factor de seguridad bajo carga sísmica sea igual a 1. En la Figura 5-9, Figura 5-10 y Figura 5-11 se presentan los valores de resistencia al corte no drenada para cada condición de análisis.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 5-9. Retro-análisis para la superficie de falla localizada sobre el estrato MH-ML

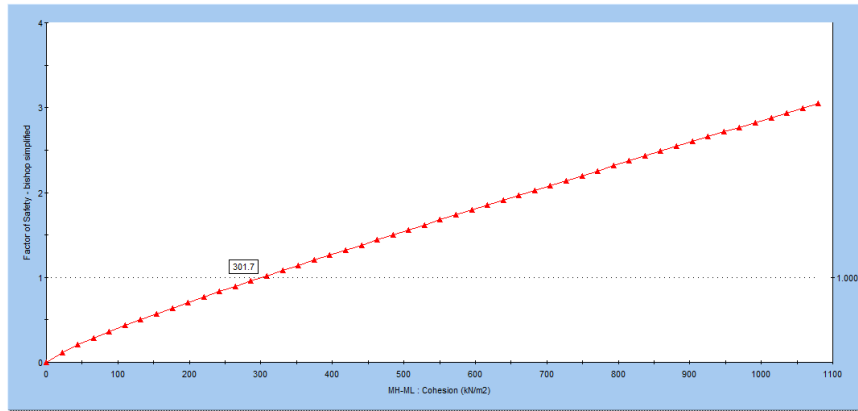


Figura 5-10. Retro-análisis para la superficie de falla localizada sobre el estrato MH

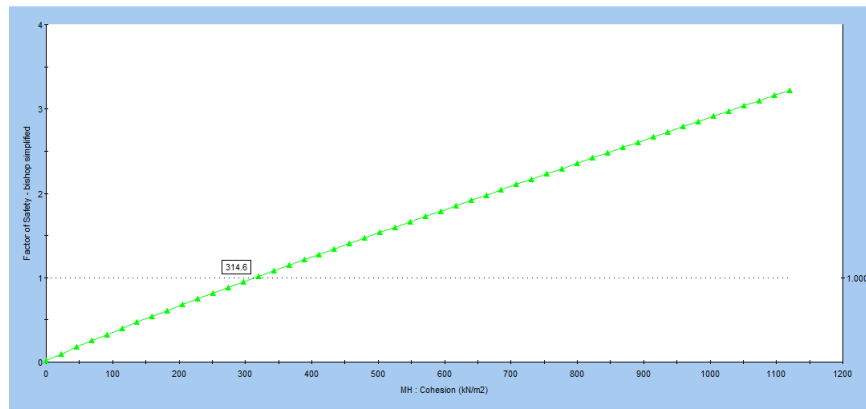
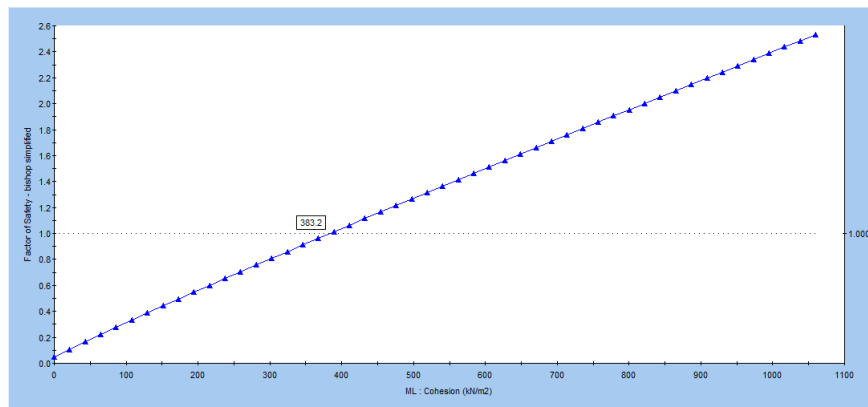


Figura 5-11. Retro-análisis para la superficie de falla localizada sobre el estrato ML



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Del análisis anterior se obtuvieron los valores de resistencia al corte no drenada (S_u) para cada uno de los estratos. Con los nuevos parámetros de resistencia al corte no drenada obtenidos se realizó la evaluación de factores de seguridad en condición estática como se presentan en el Cuadro 5-7.

Cuadro 5-7. Resumen de parámetros de resistencia a partir del retro-análisis bajo condiciones no drenadas.

Localización superficie de deslizamiento	S_u (kPa)	Factor de seguridad
MH-ML	301,7	2,44
MH	314,6	2,46
ML	383,2	2,44

Como se observa en el cuadro anterior los parámetros al corte no drenado son muy altos, y considerando que en condición no drenada (esfuerzos totales) se desestima el incremento de presión de poros, estos parámetros no evalúan la verdadera condición de falla de la ladera.

Condiciones drenadas

El análisis en condiciones drenadas se evaluó realizando un análisis de sensibilidad, en el cual se varían los parámetros de cohesión y ángulo de fricción de tal manera que el factor de seguridad bajo condiciones pseudoestáticas sea igual a 1. Como en los casos anteriores el análisis se ejecutó con la localización de la superficie de deslizamiento en cada uno de los estratos de limo.

Los valores obtenidos con la variación del ángulo de fricción se presentan en el Cuadro 5-8.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Cuadro 5-8. Análisis de sensibilidad sobre los estratos de limo del Taco 3, con variación de los parámetros de resistencia al corte drenada.

MH-ML			MH			ML		
ϕ'	Tan ϕ'	c'	ϕ'	Tan ϕ'	c'	ϕ'	Tan ϕ'	c'
0	0,00	301,6	0	0,00	303,1	0	0,00	358,0
5	0,09	237,3	5	0,09	242,8	5	0,09	289,0
10	0,18	172,2	10	0,18	181,8	10	0,18	219,1
15	0,27	105,2	15	0,27	119,0	15	0,27	147,2
20	0,36	35,07	20	0,36	53,36	20	0,36	72,1
22	0,40	5,89	23	0,42	12,01	24	0,45	8,73
22,39	0,41	0,00	23,85	0,44	0,00	24,53	0,46	0,00

Con los resultados obtenidos y con cada una de las variaciones de cohesión y ángulo de fricción se obtuvieron los siguientes factores de seguridad en condiciones estáticas.

Cuadro 5-9. Resultados de análisis de estabilidad bajo condiciones estáticas para cada variación de c' y ϕ' .

MH-ML			MH			ML		
ϕ'	c'	FS	ϕ'	c'	FS	ϕ'	c'	FS
(°)	(kPa)		(°)	(kPa)		(°)	(kPa)	
0	301,6	2,44	0	303,1	2,50	0	358	2,54
5	237,3	2,44	5	242,8	2,50	5	289	2,54
10	172,2	2,45	10	181,8	2,50	10	219,1	2,55
15	105,2	2,45	15	119	2,51	15	147,2	2,55
20	35,07	2,46	20	53,36	2,51	20	72,13	2,56
22	5,887	2,46	23	12,01	2,52	24	8,733	2,56
22,39	0	2,46	23,85	0	2,52	24,53	0	2,56

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

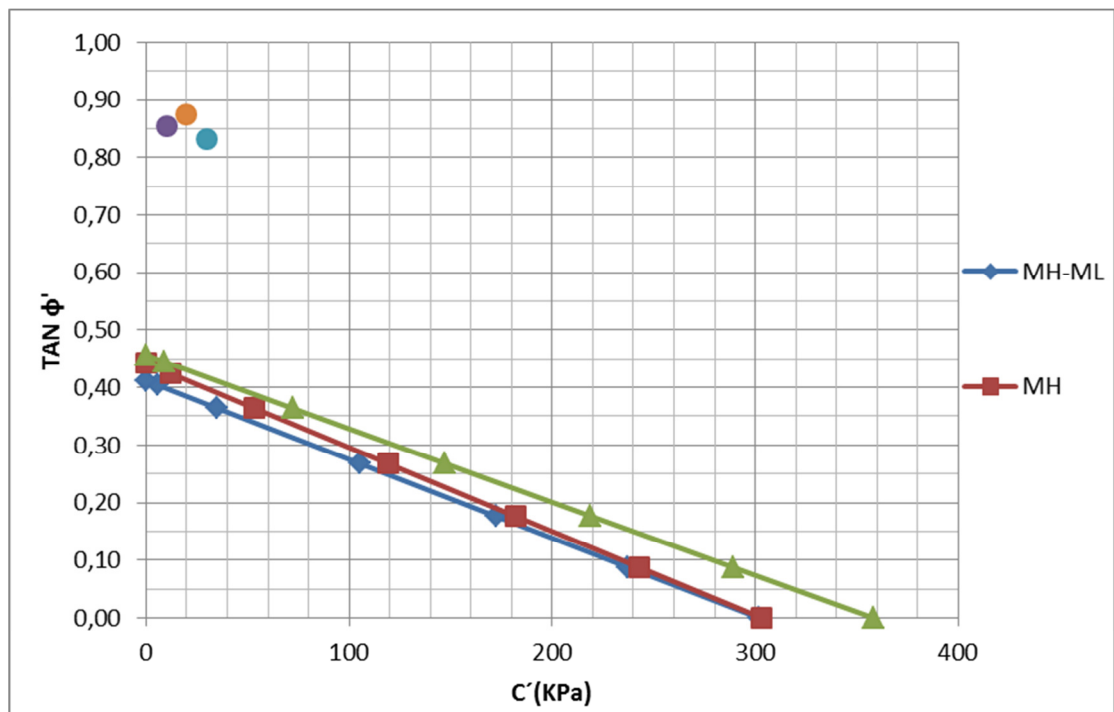
A partir de los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad y con los resultados de los ensayos triaxiales consolidados rápidos con medición de poros realizados por Arizitia y Vicuña (1968) se determinó cuál sería la combinación óptima que representará las condiciones iniciales de los estratos. Así, se realizó la comparación entre los valores obtenidos con los ensayos triaxiales y a partir del análisis de sensibilidad, tal como se muestra en la Figura 5-12.

Los resultados de los ensayos triaxiales se presentan en el Cuadro 5-10.

Cuadro 5-10. Resumen de resultados de los ensayos triaxiales realizados para los limos que conforman la ladera del Taco 3.

Muestra	ϕ' (°)	c' (kPa)
ML	40,50	10,00
MH - Dúctil	39,80	30,00
MH- Frágil	41,20	20,00

Figura 5-12. Valores obtenidos a partir del análisis de sensibilidad y ensayos triaxiales.



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Como se aprecia en la figura anterior, los valores estimados a partir del análisis de sensibilidad se encuentran muy por debajo de los obtenidos por los ensayos triaxiales. Sabiendo que los ensayos triaxiales se ejecutaron sobre muestras superficiales inalteradas del Taco 3, y que brindan una mayor confiabilidad sobre la caracterización geotécnica de los materiales, mientras que el análisis de sensibilidad es sólo una proximidad con la cual no se garantiza la veracidad de los parámetros geotécnicos, se decidió tomar como parámetros de resistencia de los materiales limosos los obtenidos a partir de los ensayos triaxiales.

Por lo tanto, la caracterización geotécnica con la cual se procederá a realizar los siguientes análisis se presenta en el Cuadro 5-11.

Cuadro 5-11. Resumen de parámetros geotécnicos de los materiales que conforman la ladera del Taco 3.

Material	Descripción	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k (x10-6 m/s)	E (MPa)
SM	Arenas limosas con algo de gravas dispersas	19	0	37	1,1	60
MH-ML	Alternación de limos de alta y baja plasticidad, de color gris claro y oscuro	16,8	30	39,8	5,04	k = 305,43; n=1,29
MH	Limos plásticos con estratificaciones delgadas de arenas orientadas horizontalmente y a 45°, de color gris verdoso	17,3	20	41,2	5,04	k=827,83; n=0,24
ML	Limos poco plásticos color gris claro y oscuro	15,3	10	40,5	0,15	k=553,40; n=0,50
Morrena	Morrena glaciar compuesta por grava en matriz de arena gruesa	24	700	30	0,29	200

Donde,

γ : Peso unitario total

c' : cohesión efectiva

ϕ' : ángulo de fricción efectivo

k: Coeficiente de permeabilidad

E: Módulo de elasticidad. Donde k y n son parámetros del modelo hiperbólico.

Como se observa en el cuadro anterior, los ángulos de fricción (ϕ') para los limos lacustres obtenidos de los ensayos triaxiales son bastante elevados indicando que

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

estos estratos se encuentran sobre consolidados y que también ha sido confirmado por los estudios anteriores realizados sobre estos materiales.

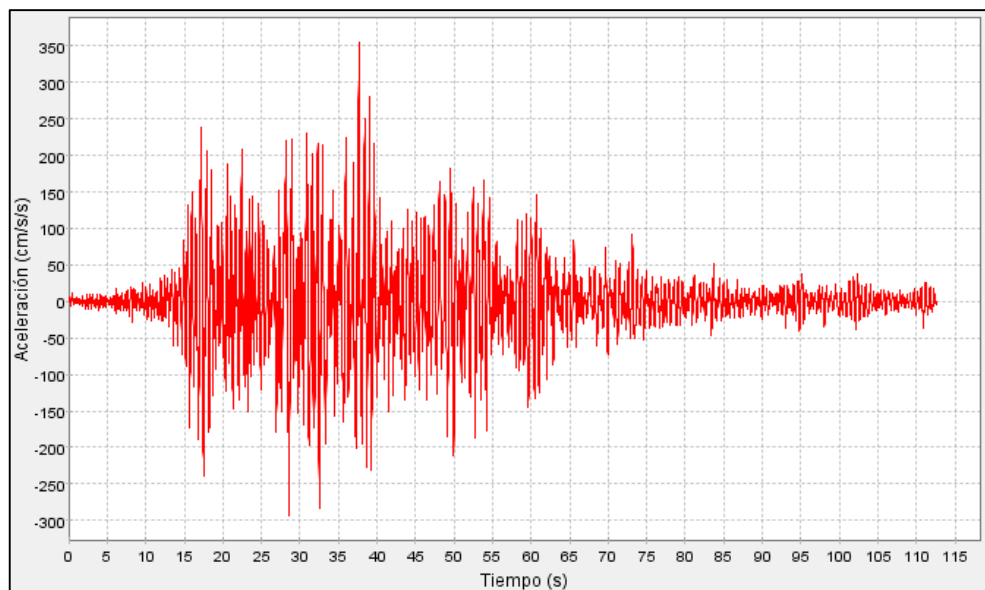
5.2 Evaluación de la aceleración crítica

A partir del año 1963 se inició el año geofísico internacional y fue hasta entonces donde se instalaron varios instrumentos sismológicos en distintas partes de la tierra, siendo más modernos, sensibles y confiables que los instrumentos instalados en épocas anteriores.

Dado que el evento sísmico del presente estudio ocurrió en el año 1960, no se encuentran registros de aceleración de este movimiento tectónico. Sin embargo, a partir del estudio sísmico se consideró que el terremoto de Marzo de 1985 de Valparaíso puede ser usado como registro de aceleración.

El sismo del 3 de marzo de 1985 registrado a las 19:47 hora local, en cercanías de la comuna de Viña del Mar, tuvo una magnitud de 7,5 en la escala sismológica de magnitud de momento. El evento sísmico ocasionó la licuación de las dunas en las áreas de Viña del Mar y San Antonio, y grietas y hundimientos de tierra, y numerosos deslizamientos de tierra en las montañas costeras. Se registraron por lo menos 177 personas muertas, 2575 heridos y graves daños en el centro de Chile, incluyendo las ciudades de San Antonio, Valparaíso, Viña del Mar, Santiago y Rancagua. El registro de aceleración se presenta en la Figura 5-13.

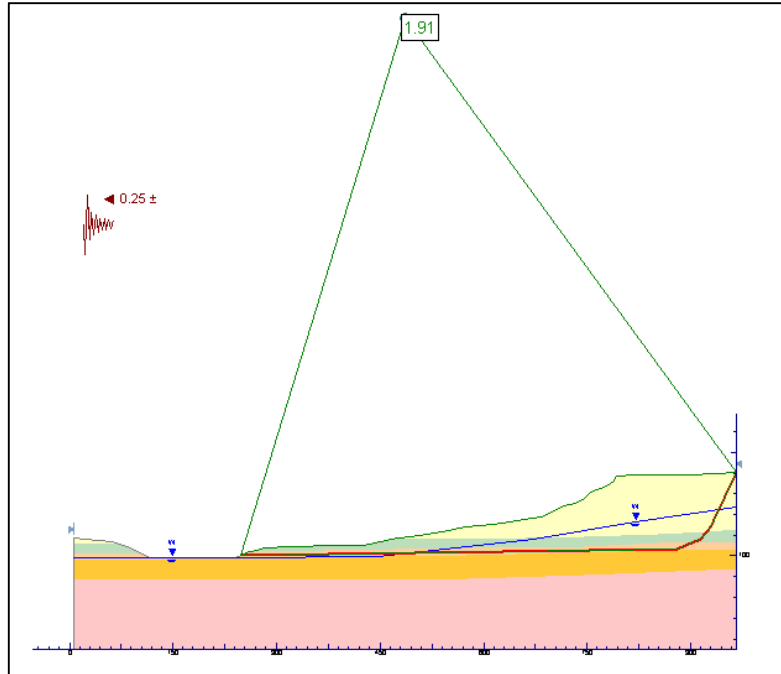
Figura 5-13. Registro de aceleración – Terremoto de Valparaíso 03/03/1985 22:47:07 UTC. Estación Viña del Mar, Chile. Latitud & Longitud: -33.0200, -71.5700. Componente 200. Tomada de la base de datos de United States Geological Survey (USGS).



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

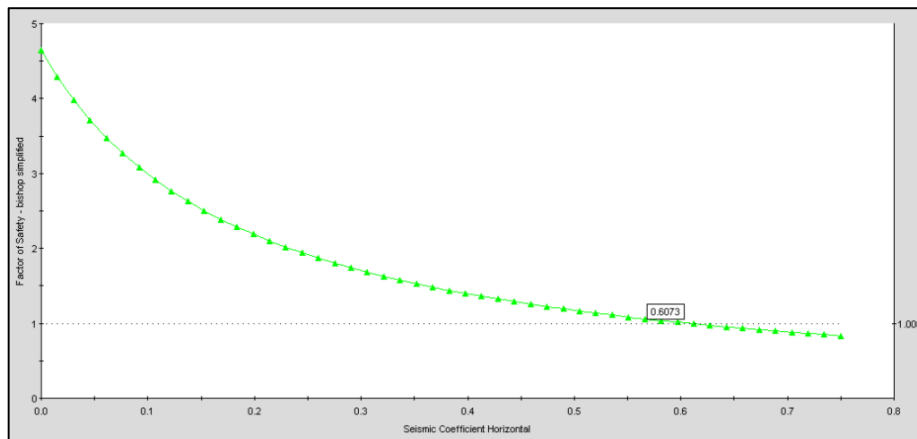
Para la evaluación de la aceleración crítica se calculó el factor de seguridad mediante el método de equilibrio límite con un coeficiente de aceleración horizontal de 0,25 g, tal y como se definió en la sección 3.3.1. Del análisis pseudoestático se obtuvo un factor de seguridad igual a 1,91 (Véase Figura 5-14).

Figura 5-14. Análisis pseudo-estático del Taco 3.



Dado que la aceleración crítica es representada por un coeficiente horizontal que produce un factor de seguridad 1,0, se realizó un análisis de sensibilidad con el cual se pudiera determinar dicho coeficiente. Los resultados se presentan en la Figura 5-15.

Figura 5-15. Determinación de la aceleración crítica.



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Del análisis de sensibilidad se obtuvo que la aceleración crítica se relacione con un coeficiente de aceleración horizontal igual a 0,61g. La magnitud de la aceleración crítica es considerablemente alta, lo que indica que el gran deslizamiento del Taco 3 no pudo ser generado exclusivamente por las fuerzas inerciales del evento sísmico de 1960. Para ello se habría requerido de por lo menos un coeficiente de aceleración horizontal de 0,61g, con lo cual se generarían desplazamientos en la ladera. Adicionalmente, con los análisis realizados en el presente estudio y considerando las diferentes investigaciones realizadas sobre el Taco 3, el coeficiente de aceleración horizontal promedio ha sido estimado en 0,22 g con un valor máximo de 0,31g. Con los anteriores resultados se considera que el valor de 0,61g está bastante apartado de los eventos reales ocurridos.

Por lo tanto, se concluye que las fuerzas sísmicas que experimentó la ladera del Taco 3 por el sismo de 1960 no pudieron generar el deslizamiento de esa gran masa de suelo, y que la licuación del estrato de los depósitos lacustres posiblemente causó la pérdida de resistencia y por ende el movimiento del terreno.

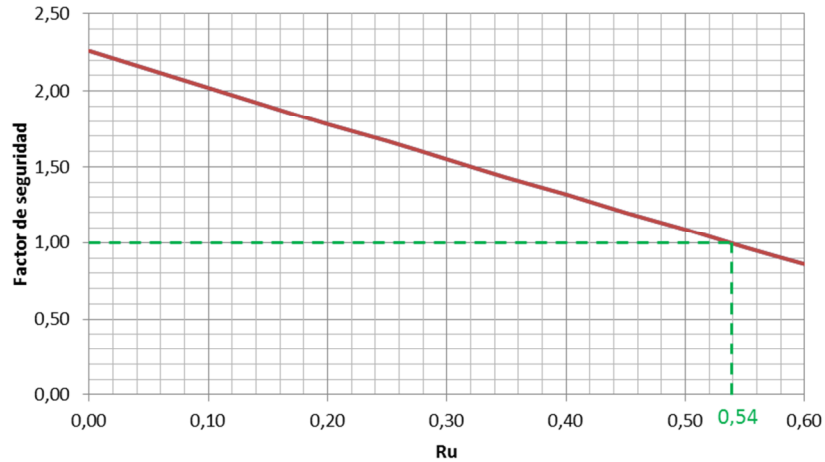
5.2.1 Incremento en la presión de poros

A partir de la determinación de la aceleración crítica y del análisis de estabilidad bajo condición pseudoestática se evaluó el incremento en la presión de poros sobre la ladera del Taco 3 por efecto de los movimientos telúricos experimentados el 22 de mayo de 1960, que pudo ocasionar la pérdida de resistencia al corte de los estratos de limo lacustre y consecuentemente el megadelizamientos del Taco 3.

Para estimar el incremento en la presión de poros sobre los estratos de limo lacustre se realizó un análisis de sensibilidad en el programa Slide 6.0 de Rocscience para el modelo presentado en la Figura 5-14, con el fin de determinar la relación de presión de poros (r_u) con la cual el factor de seguridad bajo condición pseudoestática sea igual a 1.

La variación del factor de seguridad dependiente de la relación de poros (r_u), bajo condición pseudoestática, se presenta en la Figura 5-16.

Figura 5-16. Factor de seguridad vs r_u bajo condición pseudoestática



Como se observa en la figura anterior, bajo condición pseudoestática (coeficiente horizontal de aceleración sísmica igual a 0,25), para una relación de poros (r_u) igual a 0,54, el factor de seguridad obtenido es igual a 1. Partiendo del resultado anterior y sabiendo que la relación de poros se define por:

$$r_u = \frac{u}{\gamma H} = \frac{u}{\sigma_v}$$

Donde,

u_1 = Presión de poros (debida al sismo)

γ = peso unitario total del suelo

H = profundidad correspondiente a la presión de poros

σ_v = Esfuerzo vertical total

Se puede determinar la presión de poros total debida al sismo, así:

$$u = \sigma_v \times r_u = 1780 \frac{kN}{m^2} \times 0,54 = 961,47 \frac{kN}{m^2}$$

Partiendo del valor anterior y conociendo el valor de la presión de poros hidrostática a la profundidad de los limos (u), determinamos el incremento ocurrido por efecto del sismo.

$$\Delta u = u_1 - u = 961,47 \frac{kN}{m^2} - 455 \frac{kN}{m^2} = 506,5 \frac{kN}{m^2}$$

De los anteriores resultados obtenemos que el posible incremento en la presión de poros en los estratos de limo lacustres debido al sismo del 22 de mayo de 1960 fue de aproximadamente 506 kN/m², valor que es considerablemente alto y con lo cual se pudo generar la licuación.

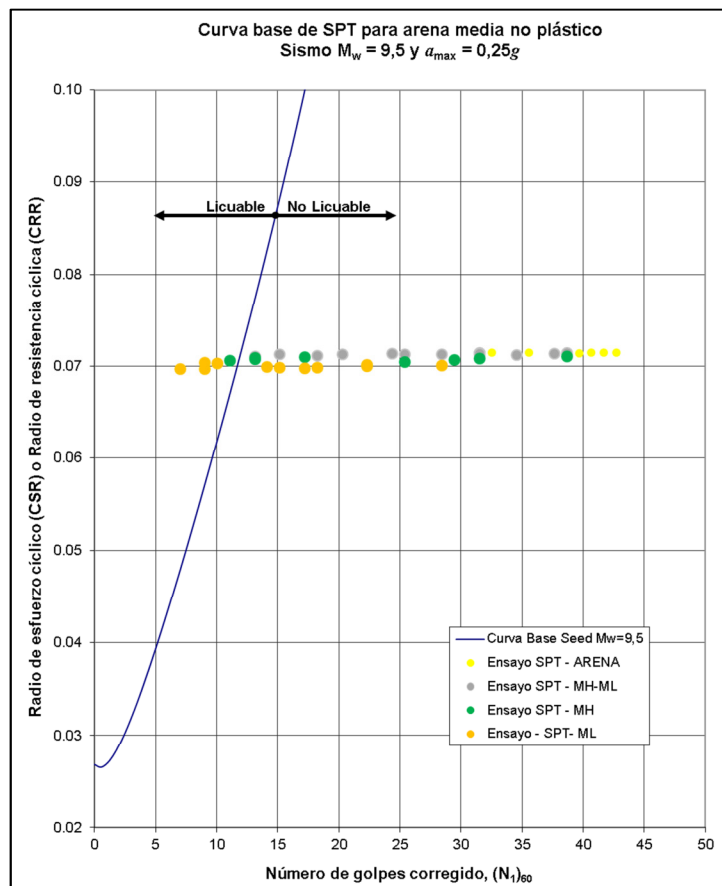
5.3 Análisis de licuación

El potencial de licuación de los sedimentos fue evaluado tomando como base el procedimiento simplificado tradicional determinístico (Seed et. al, 1985), como se presentó en el numeral 4.3. Los datos requeridos para realizar la evaluación del potencial de licuación sobre los estratos de limo lacustre fueron:

- Perfil estratigráfico del suelo.
- Características de los parámetros geotécnicos de los estratos y ubicación del nivel freático.
- Valores del número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT).
- Parámetros sísmicos de diseño, es decir, la magnitud y el coeficiente de aceleración horizontal.

Los datos anteriores fueron enunciados en las secciones anteriores del presente documento. Para la determinación de los esfuerzos verticales efectivos se consideró el espesor de material de 68 m, removido durante el deslizamiento. El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Figura 5-17.

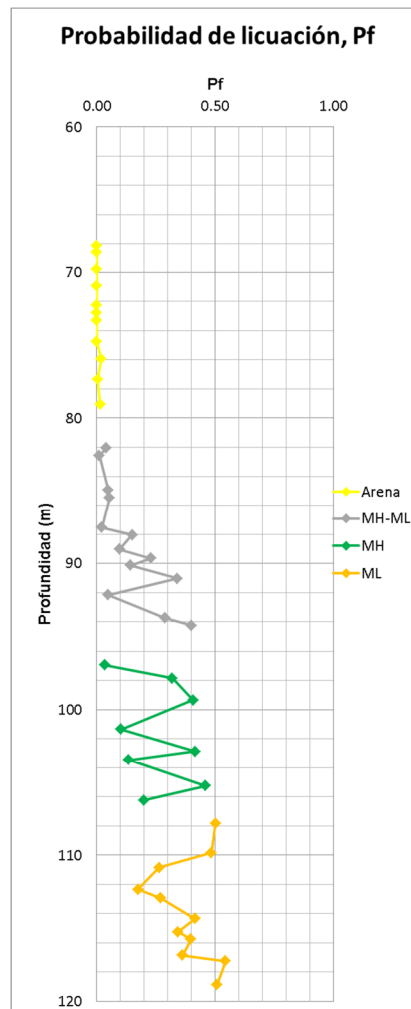
Figura 5-17. Evaluación del potencial de licuación



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Como se observa en la figura anterior, sólo una pequeña zona comprendida entre los estratos de limo de alta plasticidad y el limo de baja plasticidad son considerados como potencialmente inestables. Dado que esta es una metodología simplificada y parte del número de golpes del ensayo de penetración estándar, los resultados estimados pueden ser algo inexactos. Debido a lo anterior, se realizó la evaluación de la probabilidad de licuación tal y como se presentó en el numeral 4.3.3. En la Figura 5-18 se presenta los resultados de probabilidad de licuación a diferentes profundidades.

Figura 5-18. Probabilidad de licuación de los estratos de la ladera del Taco 3



Como se observa en la figura anterior la probabilidad de licuación para el estrato de arena es prácticamente nula, mientras que para los depósitos de limos lacustres la probabilidad de licuación varía entre 10 y 54 %. La mayor probabilidad de licuación ocurre en los estratos de limo de alta plasticidad (MH) y limo de baja plasticidad (ML).

Por tanto, se puede concluir que la licuación se presentó en la interface entre el estrato MH y ML, a una profundidad aproximada de 105 m.

Con los anteriores análisis, se puede concluir que hubo licuación en los estratos de limo que junto con los movimientos cíclicos producidos por el sismo del 22 de mayo de 1960, condujeron al deslizamiento del Taco 3.

5.4 Análisis por elementos finitos

El mega-deslizamiento del Taco 3, es un análisis de movimientos bastante complejo, ya que involucró el desplazamiento de un gran volumen de tierra. La evaluación de estabilidad por el método de equilibrio límite, que tiene en cuenta solamente procesos gravitatorios, puede no ser suficiente para la evaluación de la pérdida de resistencia al corte de los estratos que conforman la ladera, y que causaron el deslizamiento.

Como parte de esta investigación, y con énfasis en la determinación de las causas del deslizamiento del Taco 3, se realizó el análisis de esfuerzos y deformaciones del suelo por medio del método de elementos finitos, mediante el programa SIGMA/W[®].

El primer análisis consistió en definir el cambio en el estado de esfuerzos sobre el estrato de limo, donde tuvo lugar la superficie de falla del Taco 3. Para determinar el cambio de esfuerzos se simularon cuatro movimientos de tierra hasta establecer la geometría antes del deslizamiento de la ladera y así determinar la posible pérdida de resistencia en el suelo.

Posteriormente, se ejecutó el análisis dinámico con QUAKE/W[®] tomando para la condición inicial (tiempo cero) los estados de esfuerzos calculados a partir de la simulación de los cuatro movimientos modelados en el programa SIGMA/W[®].

Finalmente, se efectuó un análisis de estabilidad dinámico usando el software SLOPE/W[®] con el fin de obtener las superficies de falla que pudieron generar el mega-deslizamiento, para identificar si pueden compararse con el mecanismo de falla estimado en los estudios anteriores.

A continuación se explica con mayor detalle cada uno de los pasos descritos anteriormente, para el análisis dinámico de la ladera del Taco 3.

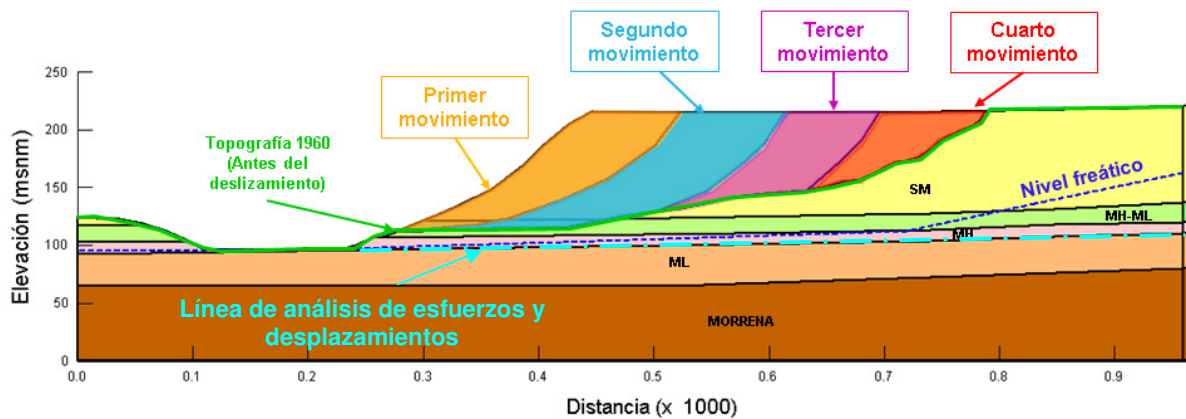
5.4.1 Análisis de redistribución de esfuerzos

En las investigaciones desarrolladas sobre el Taco 3, se observaron movimientos retrogresivos después de la ocurrencia del evento sísmico. Estos movimientos pudieron interferir en el mega-deslizamiento del Taco 3, causando una pérdida de confinamiento del suelo, al existir desplazamientos dentro del cuerpo de la ladera. Por tal motivo, para la evaluación de las pérdidas de resistencia en el suelo se

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

modelaron cuatro movimientos en el programa SIGMA/W® de GeoStudio®, hasta establecerse la topografía conocida del Taco 3 antes del evento sísmico del 22 de mayo de 1960. Esta modelación se realizó para estimar el estado de esfuerzos y deformaciones en cada uno de los cuatro movimientos como se presenta en la Figura 5-19.

Figura 5-19. Esquema de la simulación de los movimientos retrogresivos sobre la ladera del Taco 3.



A partir de la modelación de cada movimiento, se analizaron los esfuerzos efectivos y desplazamiento sobre la interface entre los limos lacustres de baja y alta plasticidad, debido a que es en esta zona donde se encuentra la superficie de deslizamiento. El cambio en el estado de esfuerzos y los desplazamientos a lo largo de la línea de análisis (Véase Figura 5-19) para cada movimiento, se presenta a continuación:

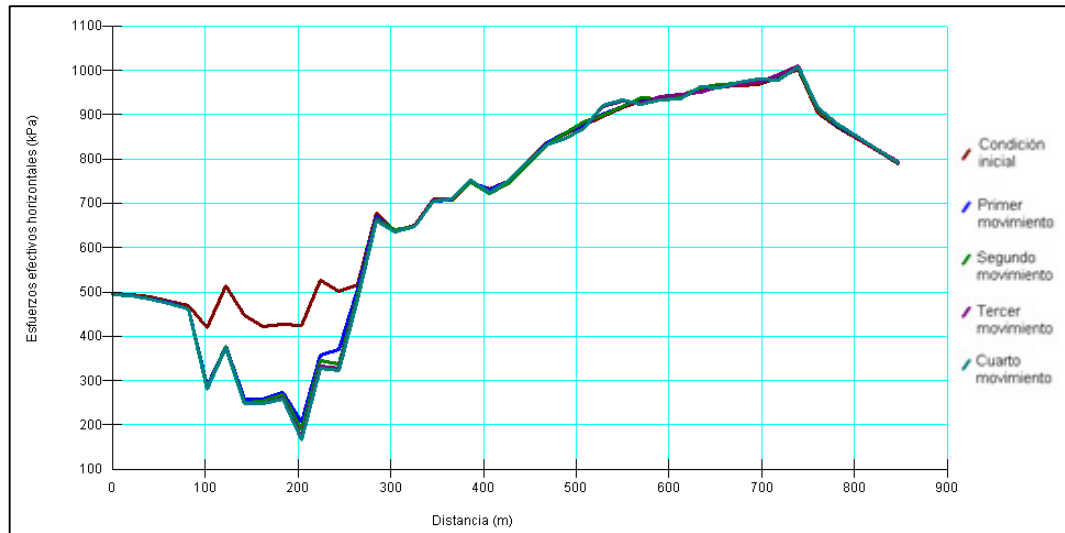
Esfuerzos efectivos horizontales

En la Figura 5-20, se presentan los esfuerzos efectivos horizontales para cada movimiento a lo largo de la línea de análisis. El mayor cambio en los esfuerzos efectivos horizontales se presenta en la zona cercana al cauce del río San Pedro, disminuyendo de 425 kPa en su estado inicial, a 170 kPa para el cuarto movimiento. La diferencia que se aprecia en los esfuerzos efectivos horizontales se debe a la pérdida de confinamiento por la remoción de material, como consecuencia del primer movimiento principalmente.

A medida que se avanza en dirección donde el nivel freático toma mayor altura (hacia adentro de la ladera), los cambios en los esfuerzos efectivos horizontales son mínimos, y se puede considerar que son constantes.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

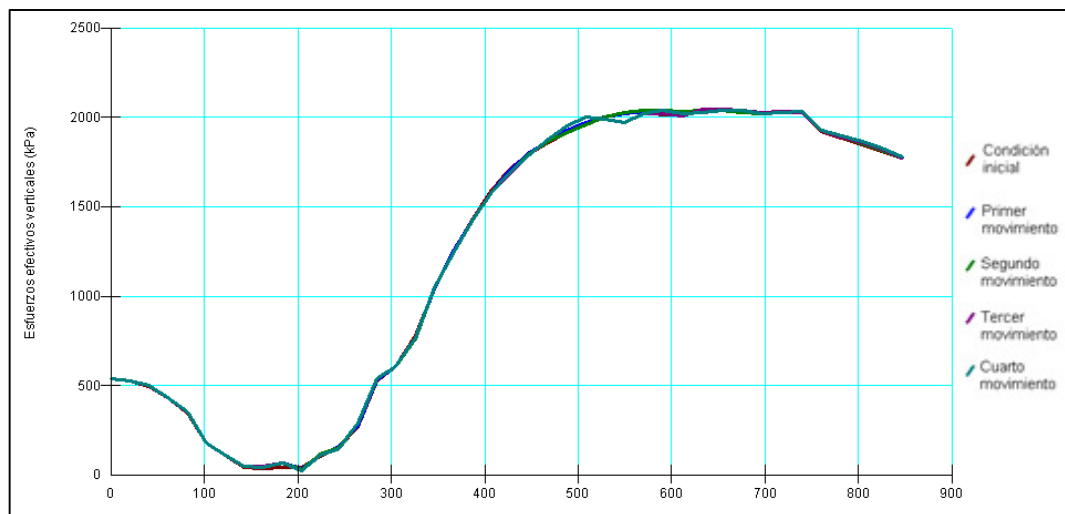
Figura 5-20. Cambio en el estado de esfuerzos efectivos horizontales (σ'_x) para cada movimiento de tierra.



Esfuerzos efectivos verticales

En cuanto a los esfuerzos efectivos verticales, se observa que cerca al cauce estos se mantienen constantes a diferencia de los horizontales. Hacia aguas arriba de la ladera los esfuerzos efectivos son muy altos con valores entre 1040 kPa a 2020 kPa, debido a la profundidad aproximada de 105 m en la que se localiza la línea de análisis, y por ende el confinamiento de los materiales en esta zona. (Véase Figura 5-21).

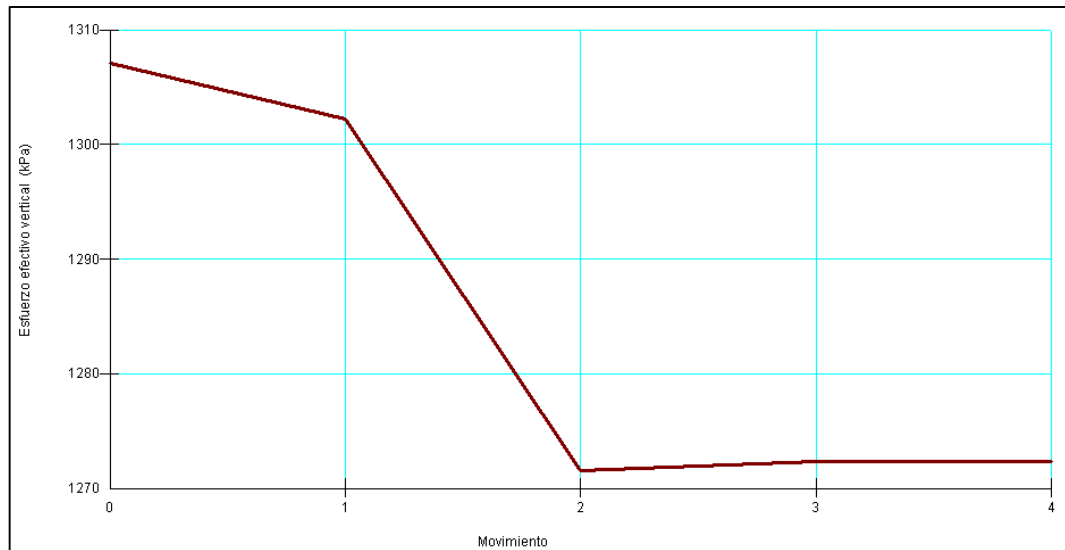
Figura 5-21. Cambio en el estado de esfuerzos efectivos verticales (σ'_y) para cada movimiento de tierra simulado.



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Dada la escala de las ordenadas en la figura anterior, no se puede percibir claramente los cambios en el estado de esfuerzos efectivos verticales en cada movimiento. Así que para poder determinar la variación de los esfuerzos, se presenta en la Figura 5-22 la gráfica de esfuerzo vertical vs movimiento para un nodo sobre la línea de análisis en la abscisa 450.

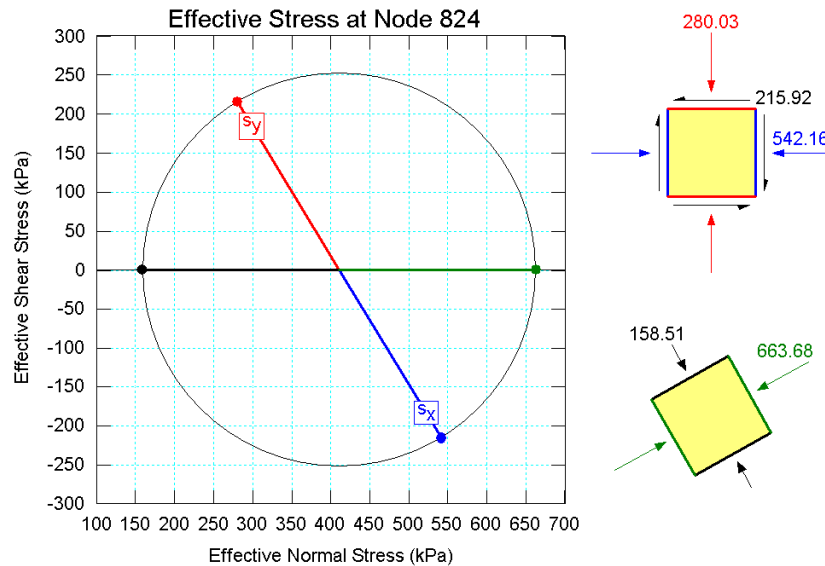
Figura 5-22. Esfuerzo vertical vs movimiento



Como se presenta en la Figura 5-22, los esfuerzos verticales efectivos disminuyen 35 kPa desde su condición inicial hasta el cuarto movimiento. Siendo notable desde el movimiento 1 hasta el movimiento 2, dado que el nodo de análisis se encuentra mayormente influido por estos dos tiempos debido a su localización.

Como se puntualizó anteriormente, el mayor cambio en los estados de esfuerzos efectivos se genera en cercanías al cauce del río San Pedro, principalmente en los esfuerzos efectivos horizontales. Y es en esta zona, donde el esfuerzo efectivo horizontal es mayor al esfuerzo vertical promoviendo posibles deslizamientos por pérdida de confinamiento. (Véase Figura 5-23)

Figura 5-23. Distribución de esfuerzos efectivos. Diagrama del círculo de Mohr.



Desplazamientos horizontales y verticales

En cuanto a deformaciones en dirección X, estas presentan valores positivos, es decir con movimientos hacia la derecha, en el extremo izquierdo de la sección. Mientras que en la zona derecha los valores son negativos, mostrando movimientos hacia la izquierda. Los máximos desplazamientos se presentan en cercanías de la ladera con valores entre 10 a 12 mm, manteniéndose casi constantes para los cuatro movimientos. Pero a medida que se alejan del cauce la diferencia se hace un poco más notable entre cada movimiento. (Véase la Figura 5-24)

Los desplazamientos en sentido Y presentan variaciones entre asentamientos (valores negativos) y levantamientos (valores positivos). Mostrando su valor máximo en cercanías al cauce con un valor de 12,5 mm. La diferencia entre los desplazamientos para cada movimiento es mínima, al igual que en los desplazamientos horizontales. (Véase Figura 5-25).

En general los desplazamientos a lo largo de la estructura conservan el mismo orden de magnitud. Lo cual se ve reflejado en los resultados de los esfuerzos efectivos obtenidos durante los cuatro movimientos simulados, que mantuvieron un comportamiento muy similar en comparación con el análisis estático inicial.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 5-24. Cambio en los desplazamientos horizontales (X) para cada movimiento de tierra.

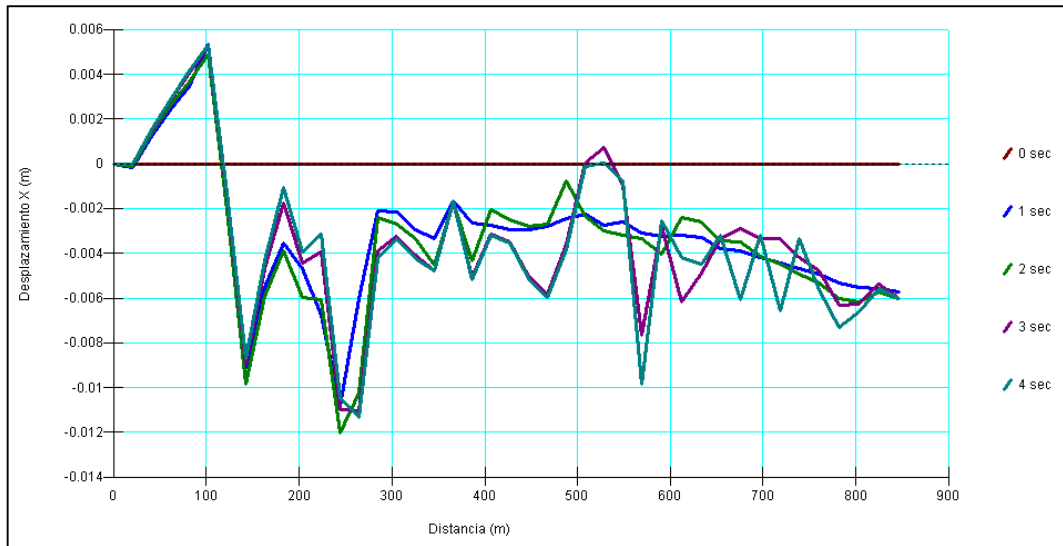
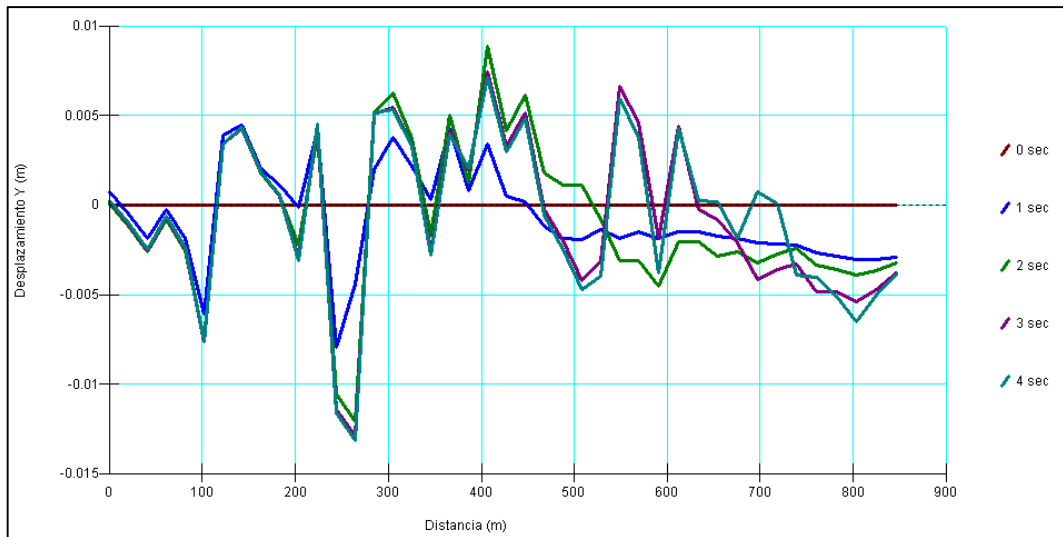


Figura 5-25. Cambio en los desplazamientos verticales (Y) para cada movimiento de tierra.



En conclusión, el cambio en el estado de esfuerzos esperado es mínimo y no debería tener mayor influencia en la pérdida por confinamiento de los estratos que conforman el Taco 3, y por ende consecuencias en su estabilidad.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

5.4.2 Análisis de estabilidad

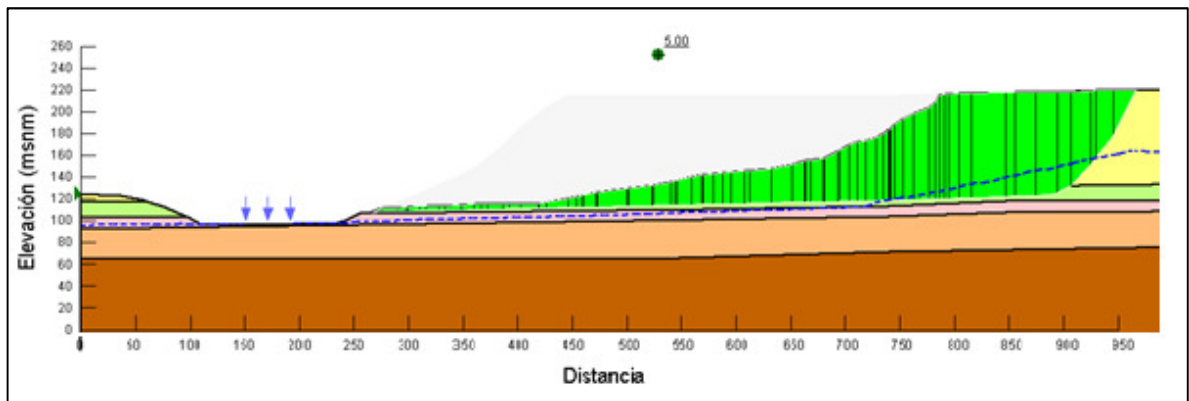
En secciones anteriores se evaluó la estabilidad de la ladera del Taco 3 por el método de equilibrio límite, que considera sólo condiciones gravitatorias, es decir, no tiene en cuenta los esfuerzos y deformaciones del suelo. Con el fin, de complementar el estudio de la estabilidad del Taco 3, se desarrolló el análisis de estabilidad estático y dinámico por el método de elementos finitos en el programa GeoStudio®.

5.4.2.1 Condición estática

El cálculo de estabilidad se ha realizado mediante el programa SLOPE/W®, el cual calcula los diferentes factores de seguridad por el método de elementos finitos a partir de los esfuerzos actuantes en la estructura. Estos esfuerzos se estimaron a partir del análisis descrito en el numeral 5.4.1.

Para el análisis de estabilidad estático de la ladera del Taco 3, se analizó el mecanismo de falla definido por Ariztía y Vicuña (1968), obteniendo un factor de seguridad de 5,0 que es bastante cercano al obtenido por Ariztía y Vicuña (1968) con un valor de 4,5. El resultado obtenido se presenta en la Figura 5-26.

Figura 5-26. Análisis de estabilidad en condición estática por elementos finitos del Taco 3.



5.4.2.2 Condición dinámico

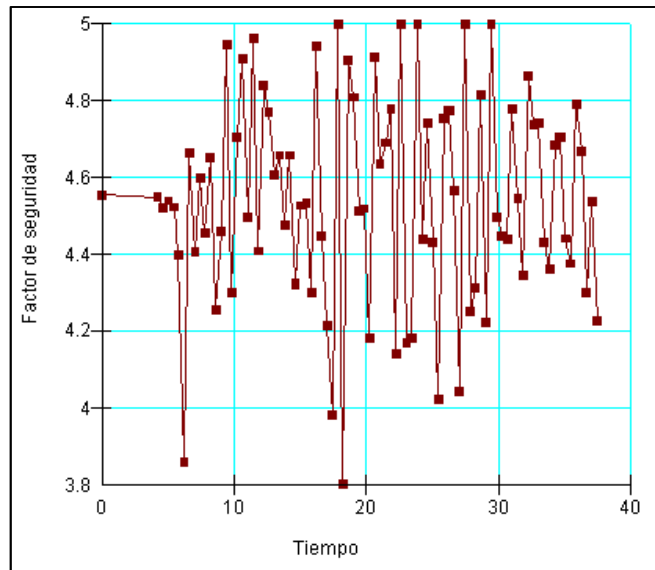
Al igual que en el análisis de estabilidad estático, en este tipo de análisis es necesario evaluar los esfuerzos actuantes en la estructura antes de la acción del sismo.

Con los esfuerzos estáticos iniciales calculados en el análisis de redistribución de esfuerzos del numeral 5.4.1, se aplicó el registro de aceleración del terremoto de Valparaíso de 1985 al modelo. De esta manera el programa QUAKE/W® genera distribuciones de esfuerzos en la estructura para cada incremento de tiempo del registro aplicado.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Para realizar los análisis de estabilidad dinámico por elementos finitos en SLOPE/W[®], se incluyó la distribución de esfuerzos generados en el modelo a causa de la acción horizontal del sismo, obtenidos en QUAKE/W[®]. Una vez hecho esto se evaluó el factor de seguridad para cada intervalo de tiempo del sismo. Los resultados de factor de seguridad versus tiempo se presenta en la Figura 5-27.

Figura 5-27. Factores de seguridad vs tiempo



Los factores de seguridad en condición dinámica oscilan entre 5,0 a 3,8, valores muy por encima de la unidad. Luego, una vez más es evidente que la ladera del Taco 3 no falló enteramente por las fuerzas inerciales aplicadas por el sismo del 22 de mayo de 1960, dado que bajo estas cargas dinámicas la estabilidad de la ladera sigue siendo satisfactoria.

6. ANÁLISIS DEL TACO 3 A PARTIR DEL CAMBIO DEL REGIMEN DE FLUJO DEBIDO AL REPRESAMIENTO DEL RÍO SAN PEDRO

6.1 Descripción general del análisis

Con el fin de evaluar la influencia del cambio del régimen de flujo de agua en el comportamiento dinámico de la ladera del Taco 3, se utilizó el paquete GeoStudio® el cual ofrece una serie de programas basados en el método de los elementos finitos.

La metodología a seguir requirió del análisis de la sección definida en el capítulo 5, pero cuya geometría y estratigrafía se definió a partir de los estudios realizados sobre el Taco 3 después de la ocurrencia del terremoto de 1960, y que se presenta en el numeral 6.2.

Una vez definida la geometría del modelo, se procedió con la caracterización geotécnica, la cual consistió en la clasificación de las propiedades elásticas, de permeabilidad, dinámicas y de resistencia al corte de cada uno de los materiales que conforman la ladera del Taco 3. Esta información fue obtenida a partir de los ensayos in-situ, de laboratorio y de información de referencia descrita en los capítulos anteriores.

El primer análisis consistió en establecer el régimen de flujo estacionario correspondiente al nivel freático actual de la ladera deducido a partir del nivel del río y las lagunas generadas en el material deslizado. Posteriormente con un análisis de flujo transitorio se incrementó el nivel del embalse para diferentes tiempos; este análisis de redes de flujo fue realizado usando el programa de elementos finitos SEEP/W® y se realizó con el fin de determinar las líneas equipotenciales y nivel freático.

Una vez calculadas las líneas equipotenciales y nivel freático para cada cambio en el nivel del río, se procedió a obtener el estado de esfuerzos geoestático inicial con QUAKE/W®, debido a que el análisis estático es utilizado como condición inicial al momento de realizar el estudio dinámico. El análisis estático inicial se realizó considerando la simulación de cada uno de los niveles de incremento del río San Pedro (utilizando los resultados de la modelación con SEEP/W® de la red de flujo para este nivel) con el fin de obtener el estado de esfuerzos efectivos (considerando la presión de poros).

Estos resultados constituyeron las condiciones iniciales (tiempo cero) del análisis dinámico bajo sismo.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

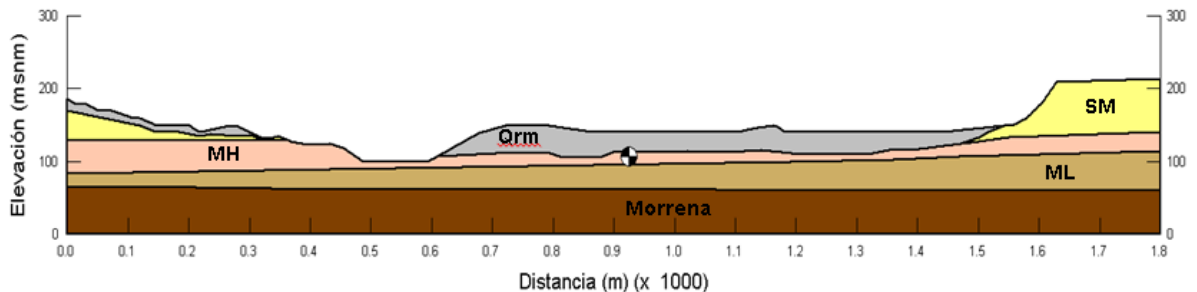
Finalmente, se efectuó un análisis de estabilidad dinámico usando el software SLOPE/W[®] con el fin de obtener los valores del factor de seguridad tanto cerca del cauce del río como en la zona del escarpe principal. En este proceso, el programa de análisis de estabilidad tomará en la base de cada una de las dovelas de la superficie de falla evaluada, los valores de presión de poros, esfuerzo vertical efectivo y aceleración nodal obtenido del análisis dinámico con QUAKE/W[®], con el fin de obtener el menor valor de Factor de Seguridad que obtuvo durante el tiempo que duró la señal del sismo introducida.

A continuación se explica con mayor detalle cada uno de los pasos descritos anteriormente, para el análisis dinámico de la ladera del Taco 3.

6.2 Modelo geológico de la ladera del Taco 3 después del deslizamiento

A partir de las exploraciones ejecutadas durante los años 1961 y 1968 a lo largo de la ladera del Taco 3 y los estudios geológicos realizados en la zona, se analizaron los materiales encontrados en cada una de las perforaciones, con el fin de establecer los diferentes estratos que conforman la ladera después de la ocurrencia del deslizamiento. El modelo geológico de la ladera del Taco 3 actualmente se encuentra conformado por depósitos de remoción en masa, estratos arenosos y limos lacustres de alta a baja plasticidad subyacentes por morrena glaciar (Véase Figura 6-1).

Figura 6-1. Modelo geológico de la ladera después del deslizamiento.



A partir de la Figura 6-1, de la descripción litológica y el análisis de los estudios realizados sobre el Taco 3, se definió el modelo geológico que se describe a continuación:

- Entre 0 a 64 metros de profundidad: Arenas limosas con algo de gravas dispersas. (SM).
- De 64 a 86 metros de profundidad: Depósitos de remoción en masa compuesto por material mal seleccionado, con tamaños que varían desde bloques hasta granos. Incluye tanto materiales rocosos como bloques de sedimentos no consolidados. (Qrm).

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

- De 86 a 100 metros de profundidad: Limos plásticos con estratificaciones delgadas de arenas orientadas horizontalmente y a 45°, de color gris verdoso. (MH).
- De 100 a 154 metros de profundidad: Limos poco plásticos color gris claro y oscuro. (ML).
- Desde los 154 metros de profundidad: Morrena glaciar compuesta por grava en matriz de arena gruesa. (Morrena glaciar).

6.3 Caracterización geotécnica

Las propiedades geomecánicas de los materiales de la ladera del Taco 3, después de la ocurrencia del deslizamiento, se determinaron a partir de los análisis realizados en el numeral 5.1. Aunque para el estrato definido como depósitos de remoción de masa (Qrm), los parámetros de resistencia se estimaron a partir de la descripción de los materiales y en base a valores típicos reportados en la literatura técnica. El resumen de los parámetros geomecánicos para cada estrato que conforma la ladera del Taco 3 se presenta en el Cuadro 6-1.

Cuadro 6-1. Resumen de parámetros geotécnicos de los materiales que conforman la ladera del Taco 3.

Material	Descripción	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k (x10 ⁻⁶ m/s)	E (MPa)
SM	Arenas limosas con algo de gravas dispersas	19	0	37	1.1	60
Qrm	Depósitos de remoción en masa compuesto por material mal seleccionado	16	0	33	71	50
MH	Limos plásticos con estratificaciones delgadas de arenas orientadas horizontalmente y a 45°, de color gris verdoso	17,3	20	41,2	5,04	k=827,83; n=0,24
ML	Limos poco plásticos color gris claro y oscuro	15,3	10	40,5	0,15	k=553,40; n=0,50
Morrena	Morrena glaciar compuesta por grava en matriz de arena gruesa	24	700	30	0,29	200

Donde,

γ : Peso unitario total

c' : cohesión efectiva

ϕ' : ángulo de fricción efectivo

k : Coeficiente de permeabilidad

E : Módulo de elasticidad. Donde k y n son parámetros del modelo hiperbólico.

6.4 Análisis de flujo subsuperficial

Para el análisis de flujo sub-superficial se utilizó el programa SEEP-W[®] del paquete GeoStudio[®], a partir del cual se determinaron las diferentes condiciones de régimen de flujo para el posterior análisis del comportamiento dinámico de la ladera del Taco 3.

Para el presente estudio, se contempló analizar la influencia que tendría un aumento súbito de los niveles normales del río San Pedro sobre la estabilidad del Taco 3 en su condición actual, ocasionado por deslizamientos de sectores potencialmente inestables localizados en el filo de aguas abajo de dicho deslizamiento, cerca de un estrechamiento del río. (Véase Figura 1-1).

Con la finalidad de determinar el comportamiento dinámico de la ladera por el cambio en el régimen de flujo, se simuló tres niveles de incremento del río San Pedro con respecto al nivel normal actual cerca del Taco 3 (EL.100,00 msnm). Basado en el nivel de aguas con el que posiblemente se represó el río San Pedro durante el sismo de Valdivia del 22 de mayo de 1960.

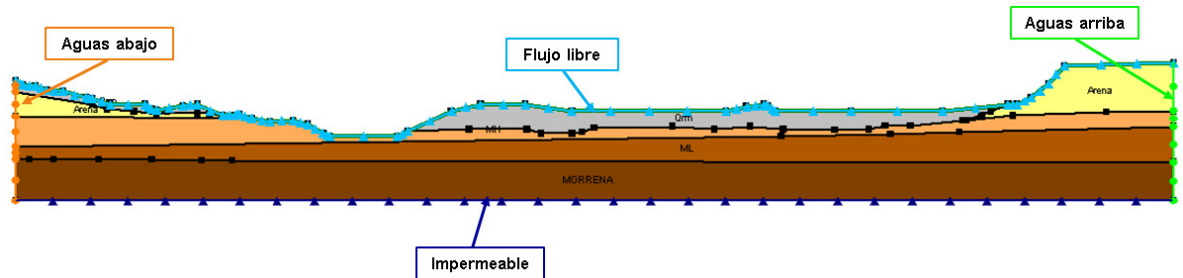
El análisis de flujo de la ladera se evaluó de la siguiente manera:

1. Se definieron los parámetros de permeabilidad para cada material como se describió en el numeral anterior y que se resumen en el Cuadro 6-1.
2. Se establecieron las condiciones de borde a lo largo de toda la ladera.

El primer análisis consistió en el cálculo de la distribución de cabeza hidráulica total en condición "steady state" (Flujo Estacionario) con la ayuda del software SEEP/W[®] a partir de condiciones iniciales y de frontera en los límites aguas arriba y aguas abajo, con los cuales se definió el escenario más probable de la localización del nivel freático. Las condiciones de borde para condición de flujo estacionario se presentan en la Figura 6-2.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-2. Modelo del análisis de flujo estacionario sobre la ladera del Taco 3



Donde,

Aguas arriba: Cabeza total = 135,43 m

Aguas abajo: Cabeza total = 129,49 m

Flujo libre: Flujo total = 0 m³/s

El segundo análisis consistió en establecer un flujo transitorio en el cual se modeló el cambio en el nivel del río evaluando tres ascensos diferentes.

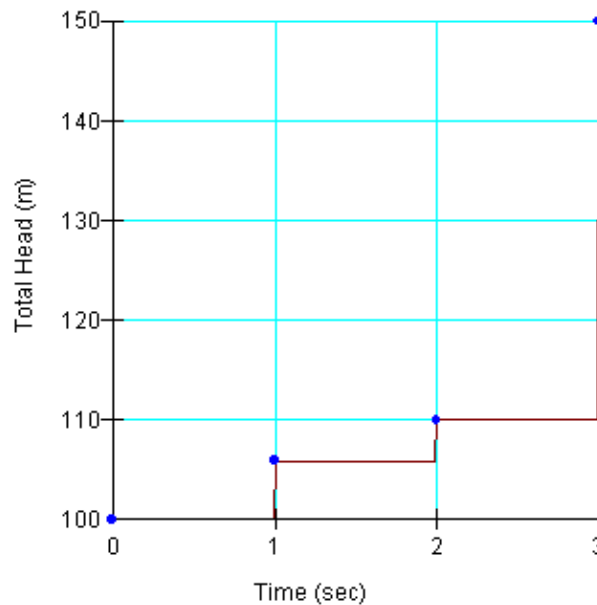
La condición inicial se estimó para el nivel actual del río a la cota 100 msnm, y se incrementó en tres pasos como se describen a continuación:

- El primer incremento del nivel del río se estableció a la cota 105,9 msnm, con un aumento del 5% respecto al nivel actual del mismo.
- El segundo incremento del nivel del río se proyectó para un aumento del 10% respecto al nivel actual, lo que equivale a un posible embalse con nivel de aguas en la EL.110,00 msnm.
- Finalmente el tercer incremento del nivel del río se estableció para un nivel de embalse en la elevación 150 msnm. Lo anterior, equivale a un aumento del 50% respecto al nivel actual.

Para la modelación en el programa SEEP/W[®] se estableció la condición de borde denominada como "Nivel del río", que simula el cambio de cabeza total en el tiempo y que se presenta en la Figura 6-3.

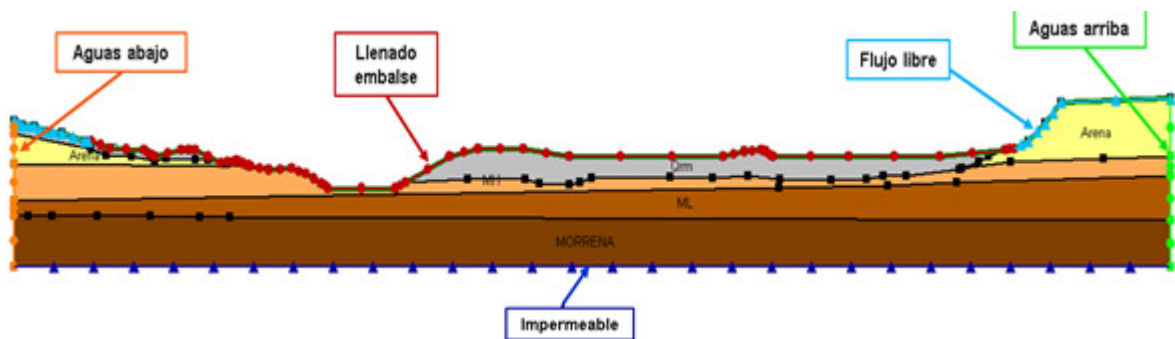
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-3. Función Nivel del río– Variación del cambio de cabeza total en el tiempo.



Para cada incremento en la lámina de agua del río San Pedro se analizó el cambio en la distribución de cabeza hidráulica total en condición “Transient” (Flujo transitorio) con la ayuda del software SEEP/W[®], definiendo la localización del nivel freático para cada cambio en el nivel del río. Las condiciones de borde para condición de flujo transitorio se presentan en la Figura 6-4.

Figura 6-4. Modelo del análisis de flujo transitorio sobre la ladera del Taco 3.



Donde,

Aguas arriba: Cabeza total = 135,43 m

Aguas abajo: Cabeza total = 129,49 m

Flujo libre: Flujo total = 0 m³/s

Nivel del río: Variación de la cabeza total entre 100 a 150 m.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

3. Por último, se obtuvo como resultado la distribución de la cabeza de presión y la cabeza total, junto con el nivel freático dentro del cuerpo para cada análisis de flujo evaluado. Los resultados de cada análisis se presentan de la Figura 6-5 a la Figura 6-12.

A partir de los resultados obtenidos se observa que para el primer y segundo incremento en el nivel del río, las líneas de flujo se dirigen desde los extremos hacia el cauce generando un efecto de sumidero. A medida que la lámina de agua aumenta del segundo al tercer incremento del río, la saturación de los estratos cerca al cauce se hace presente aumentando la cabeza hidráulica total en esta zona y direccionando el flujo desde el cauce a los extremos.

Al observar las figuras con los iso-contornos de cabeza total durante el primer y segundo incremento del nivel del río, se observa cómo a partir del análisis de flujo transitorio las líneas se concentran en cercanías al cauce del río San Pedro, con un valor máximo de cabeza total de 110 m para el primer nivel y de 112 m para el segundo. Partiendo de lo anterior, se concluye que en esta zona se presenta los gradientes hidráulicos más altos.

Las cabezas totales máximas del primer y segundo nivel del río se localizan en los extremos de la sección de análisis, con valores de 134 m hacia aguas arriba y de 128 m hacia aguas abajo. Por otra parte, en la figura de iso-contornos para la simulación del tercer incremento en el nivel del río la cabeza total máxima se evidencia en la parte central con un valor de 148 m y con valores de 136 m hacia aguas arriba y de 132 m hacia aguas abajo.

El cambio en la dirección de las líneas de corriente se hace evidente para un incremento en el nivel del río del 36% respecto al nivel actual, lo que equivale a un nivel de embalse en la EL.136,00 msnm. Esto es debido a que la cabeza total en el cauce es mayor que en los extremos.

En cuanto a las cabezas de presión, se observa que para el primer y segundo incremento del nivel del río San Pedro los valores son muy similares dado que el cambio en el nivel del embalse es mínimo (4,1 m), mientras que para el tercer nivel las cabezas de presión cerca del cauce aumentan a 20 m debido al notorio cambio en la cabeza total en esta zona (40 m).

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-5. Análisis de flujo estacionario – Distribución de las cabezas de presión (m).

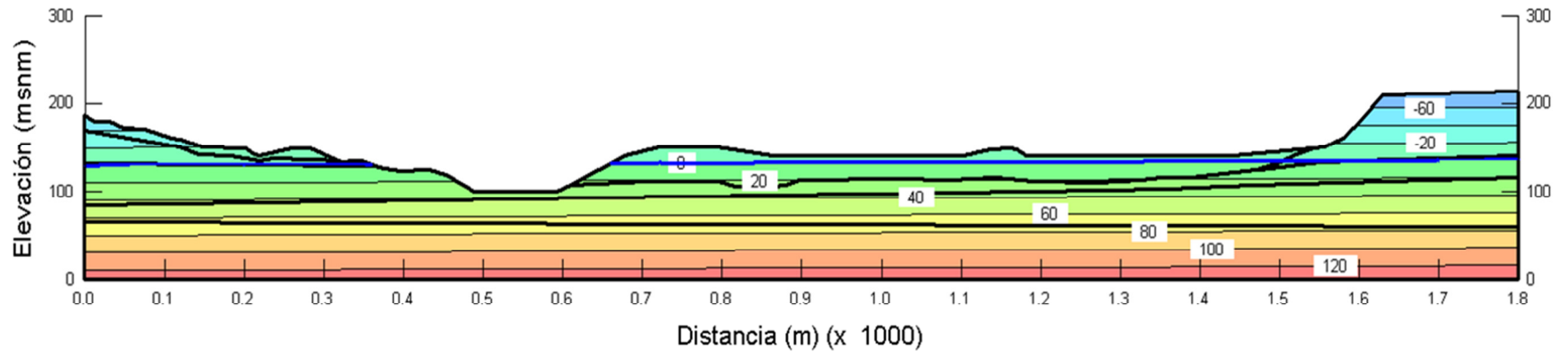
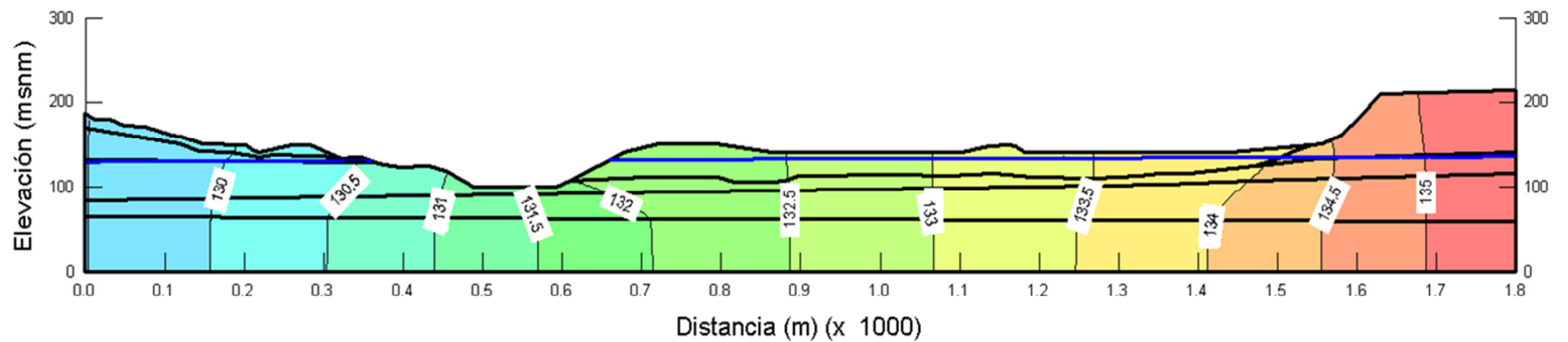


Figura 6-6. Análisis de flujo estacionario – Distribución de las cabezas totales (m).



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-7. Análisis de flujo transitorio Primer incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas de presión (m).

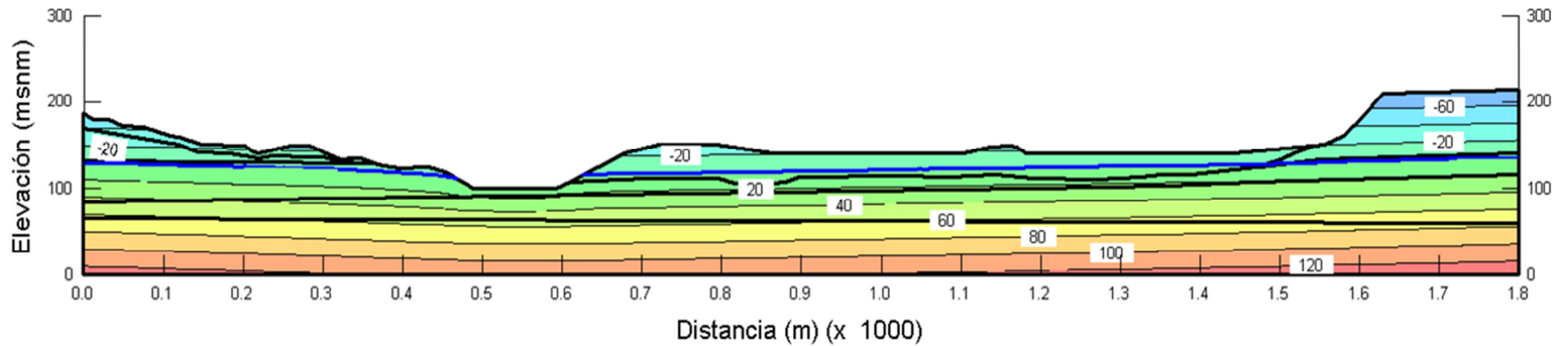
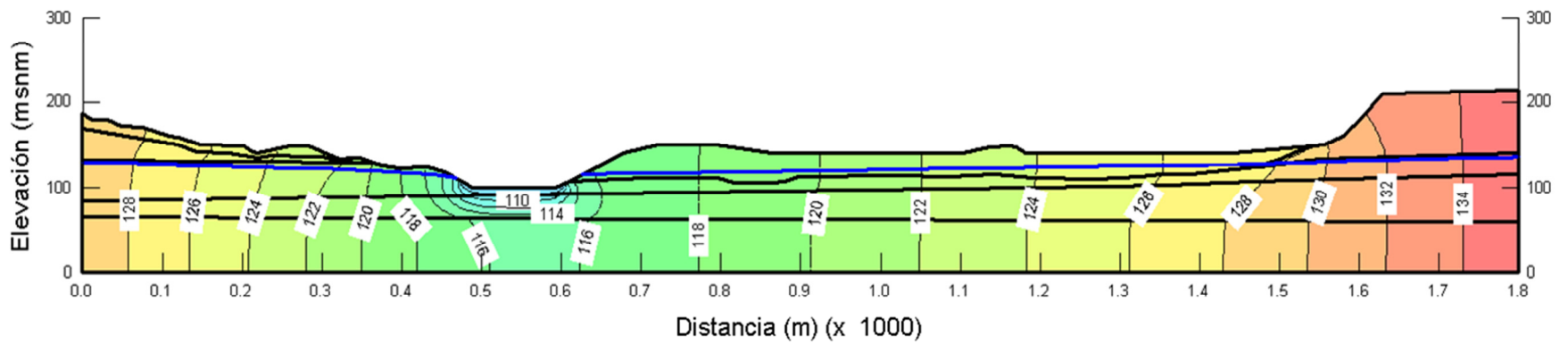


Figura 6-8. Análisis de flujo transitorio Primer incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas totales (m).



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-9. Análisis de flujo transitorio Segundo incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas de presión (m).

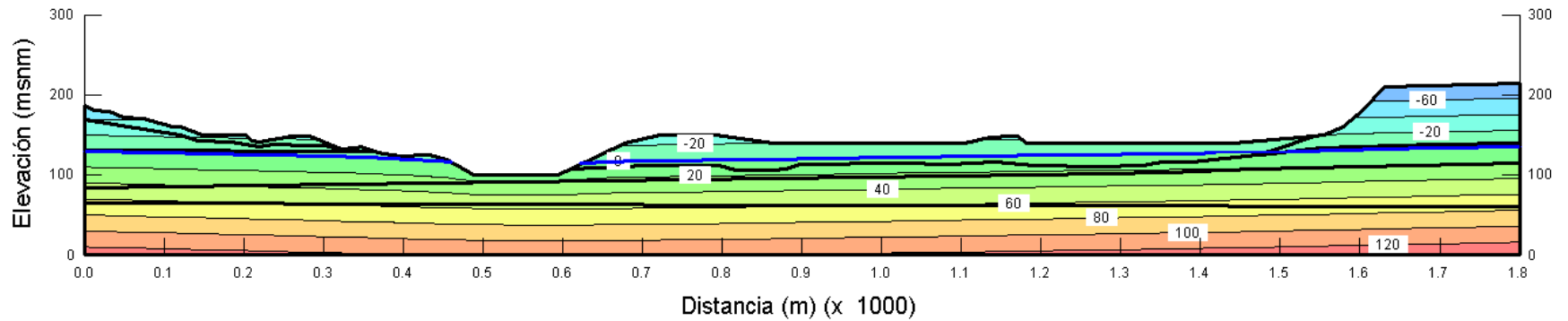
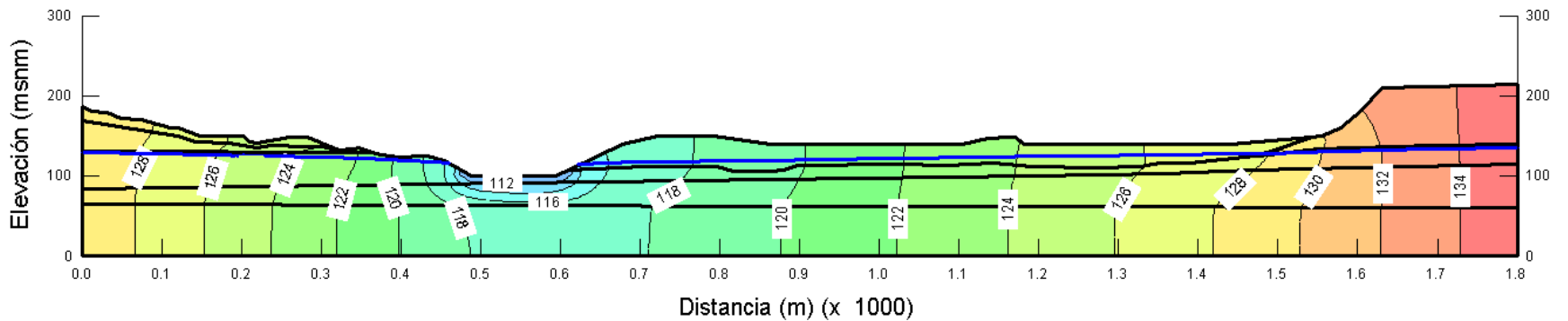


Figura 6-10. Análisis de flujo transitorio Segundo incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas totales (m).



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-11. Análisis de flujo transitorio Tercer incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas de presión (m).

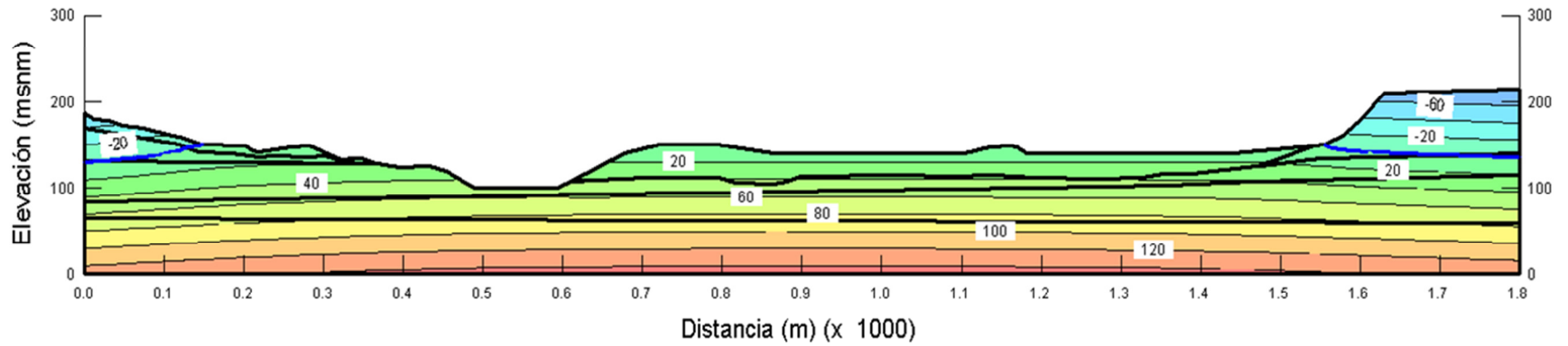
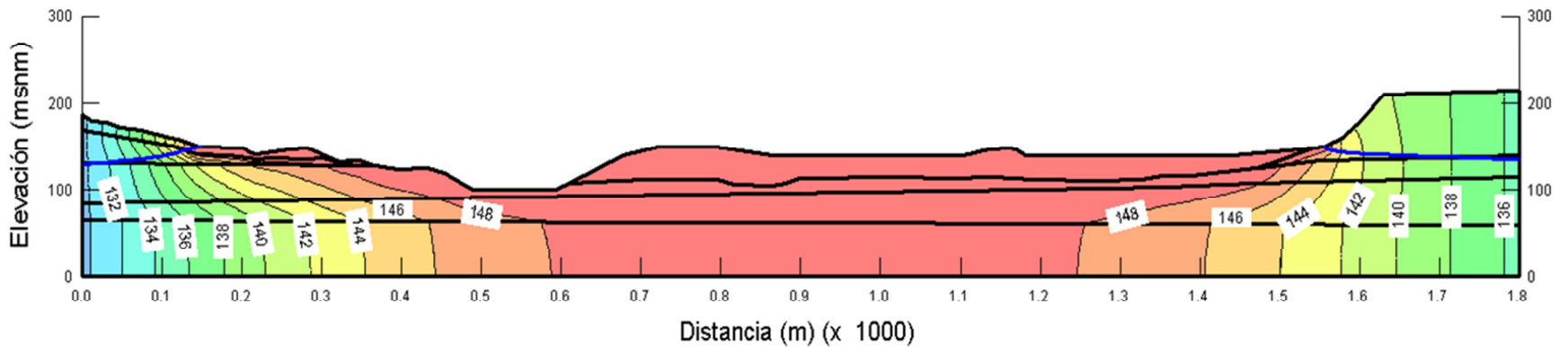


Figura 6-12. Análisis de flujo transitorio Tercer incremento del nivel del río San Pedro - Distribución de las cabezas totales (m).



6.5 Análisis de estabilidad estático

Una vez establecidas las condiciones de flujo para cada incremento en el nivel del río San Pedro, SLOPE/W[®] computa los valores de cabeza totales determinadas para cada nodo, obtenidas del análisis por elementos finitos ejecutado por el programa SEEP/W[®]. El cálculo de estabilidad se ha realizado mediante el programa SLOPE/W[®], el cual calcula los diferentes factores de seguridad bajo el método de cálculo de equilibrio límite con dovelas por el método de Morgenstern-Price, con un criterio de falla regido por la ley Mohr-Coulomb y mecanismos de falla circulares.

Para el análisis de estabilidad estático de la ladera del Taco 3, se analizaron diferentes mecanismos de falla circulares localizados cerca al cauce del Río San Pedro y en la parte del escarpe principal. Del estudio y evaluación de cada uno de los mecanismos de falla calculados para cada escenario de cambio en el nivel del río San Pedro, se escogió el mecanismo de falla circular más representativo, definido como aquel que genera un movimiento masivo profundo. El resultado de los factores de seguridad obtenidos para cada escenario se presentan en el Cuadro 6-2.

Cuadro 6-2. Resumen de resultados del análisis de estabilidad para cada incremento en el nivel de agua del río San Pedro bajo condición estática

Zona	Escenario	Factor de seguridad obtenido
Cauce	Primer incremento	2,16
	Segundo incremento	2,22
	Tercer incremento	2,27
Escarpe principal	Primer incremento	2,78
	Segundo incremento	2,78
	Tercer incremento	2,41

Los factores de seguridad obtenidos a partir del análisis de estabilidad muestran un incremento a medida que la lámina de agua del Río San Pedro va ascendiendo. Lo anterior, es debido a que el agua actúa como una fuerza estabilizadora por la sobrecarga de su propio peso.

Por tanto, si se analiza de forma contraria, es decir, en la condición de disminución en la lámina de agua, se puede concluir que la situación de inestabilidad se podría alcanzar por descensos del nivel del río San Pedro relativamente rápidos. Esto es debido a que la estabilidad está determinada por la presión de agua que se genera hacia la ladera. Los resultados de análisis de estabilidad se presentan de la Figura 6-13 a la Figura 6-18.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-13. Análisis de estabilidad condición estática – Cauze del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro

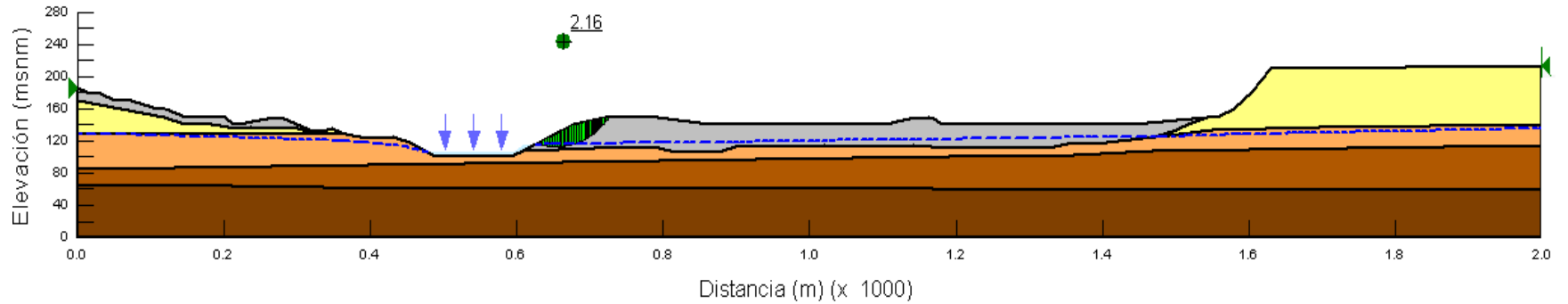
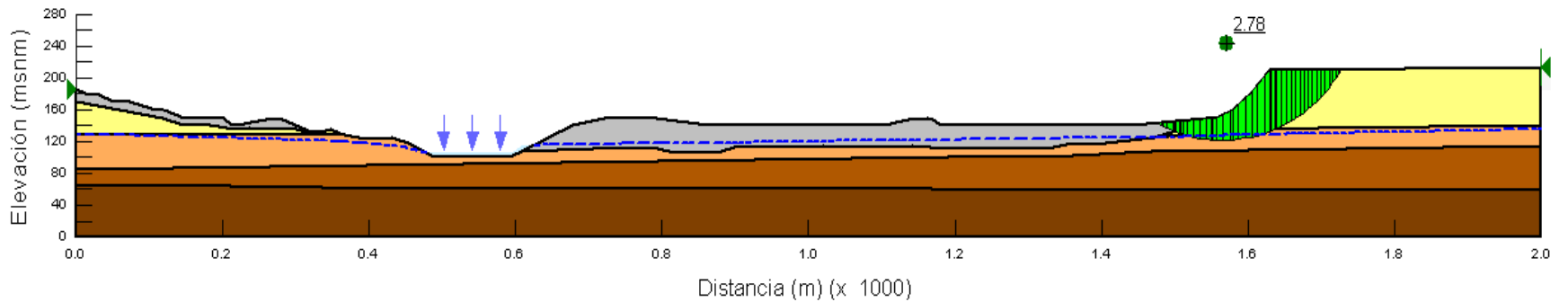


Figura 6-14. Análisis de estabilidad condición estática – Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-15. Análisis de estabilidad condición estática – Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

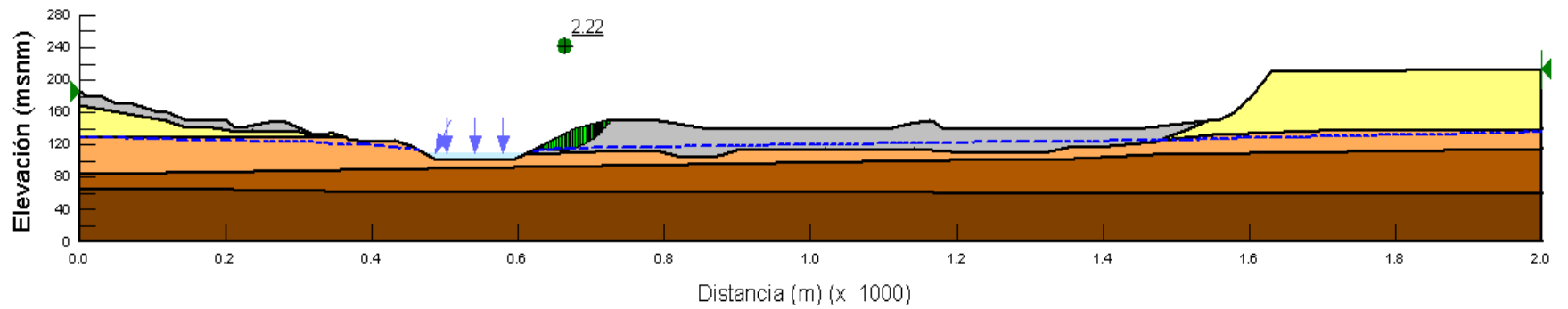
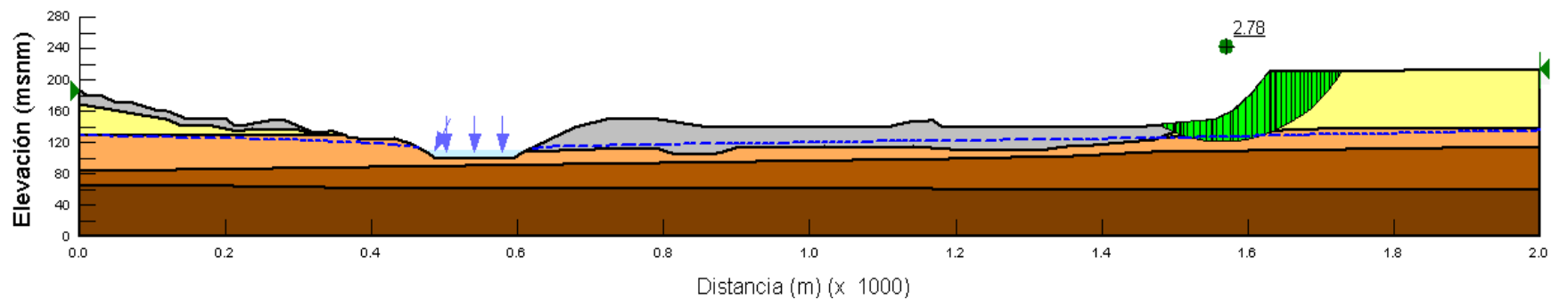


Figura 6-16. Análisis de estabilidad condición estática – Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-17. Análisis de estabilidad condición estática – Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro

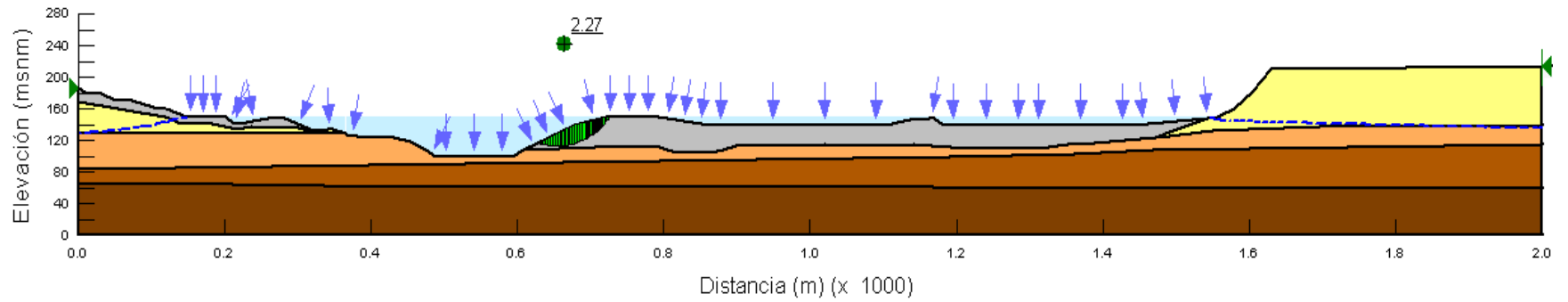
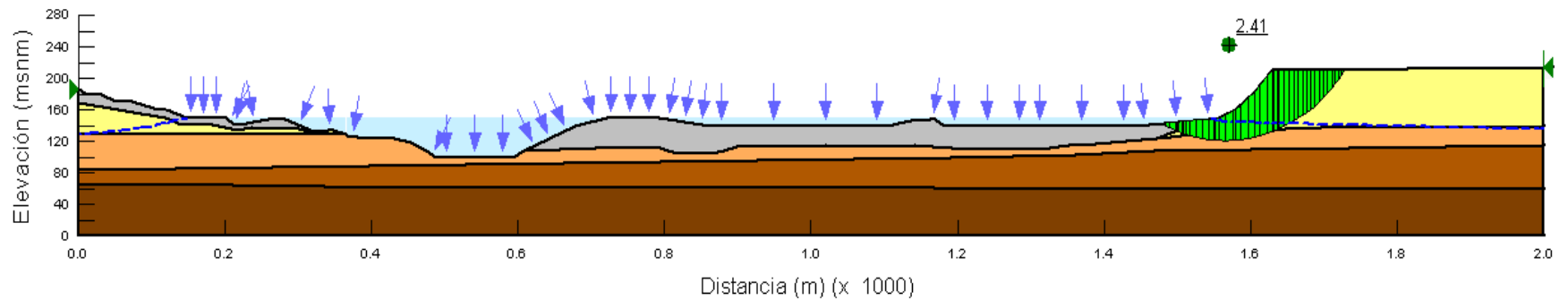


Figura 6-18. Análisis de estabilidad condición estática – Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Analizando los resultados de estabilidad para las diferentes condiciones de nivel del río San Pedro, se observa que en cercanías al cauce tanto para el primer y segundo incremento, el nivel del agua no alcanza la pata del mecanismo de falla. Luego, en el cambio del segundo al tercer incremento se pasa de una situación en la que ninguna dovela se encontraba bajo el efecto del agua, a una en la que todas las dovelas de análisis se encuentran sumergidas. Lo anterior no permite apreciar un cambio detallado en el desarrollo de los factores de seguridad a medida que el nivel del agua va subiendo dentro del cauce hasta alcanzar la altura de la ladera.

Por lo anterior, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el comportamiento de la estabilidad en la falla circular definida en el cauce del río San Pedro (Véase Figura 6-19). En la Figura 6-20 se presenta el factor de seguridad vs nivel del río San Pedro.

Figura 6-19. Esquema descriptivo del mecanismo de falla en el cauce del Río San Pedro

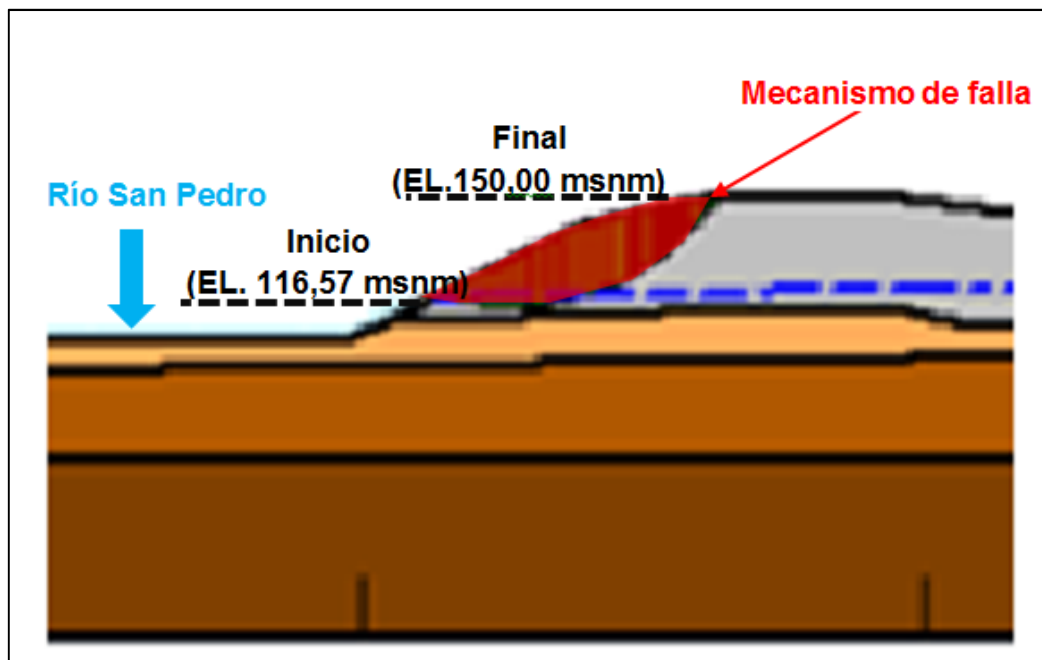
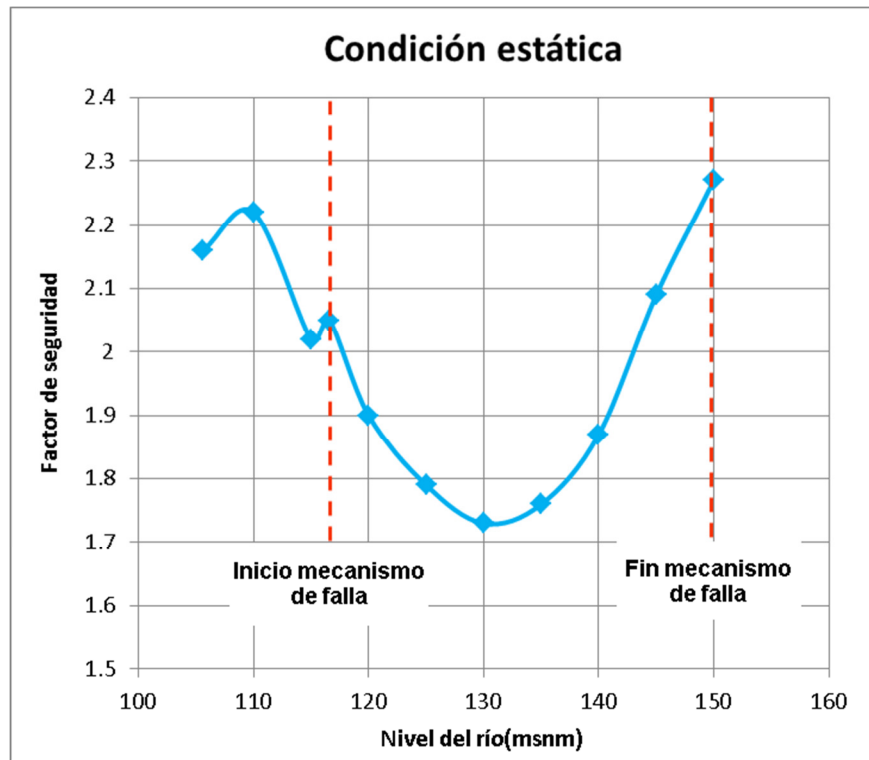


Figura 6-20. Análisis de sensibilidad para diferentes niveles del río San Pedro a lo largo del mecanismo de falla en el cauce.



Como se observa en la figura anterior, al iniciar el mecanismo de falla el factor de seguridad disminuye con el incremento del nivel del río San Pedro, hasta llegar al punto medio de la falla donde el nivel de agua del río se encuentra a la EL. 130,00 msnm con un factor de seguridad de 1,73. Posteriormente, el incremento en el factor de seguridad es proporcional al ascenso de la lámina de agua del río.

El comportamiento anterior se debe a que el agua, aunque aplique una fuerza que favorece a la estabilidad, es ella misma quien satura la parte inferior de la masa potencial deslizante y produce una reducción en el peso neto de las dovelas resistentes, haciendo que el efecto estabilizante de la fricción disminuya. Esta disminución continúa hasta que las fuerzas se equilibran y la fuerza hidrostática del agua continua aumentando, incrementando los factores de seguridad.

Adicionalmente, se realizó la modelación en el programa SLOPE/W[®], definiendo el mecanismo de falla similar al definido para el deslizamiento del Taco 3 en mayo de 1960. La superficie de deslizamiento se localizó sobre los limos lacustres, definiendo el movimiento completo sobre toda la sección transversal del Taco 3.

El resultado del análisis anterior se presenta en la Figura 6-21.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

permanentes en la ladera del Taco 3. Estos resultados permitieron analizar el comportamiento de la ladera durante y después del sismo con cada cambio en el régimen de flujo descrito en el numeral 0, así como observar el efecto del mismo en la estabilidad de la ladera.

6.6.1 Señales sísmicas de diseño

En el numeral 5.2 se presentaron las características del sismo de Valparaíso (1), con el cual se realizó el análisis dinámico de la ladera del Taco 3 antes del deslizamiento. La aceleración máxima del suelo registrada para este sismo fue de 0,35g.

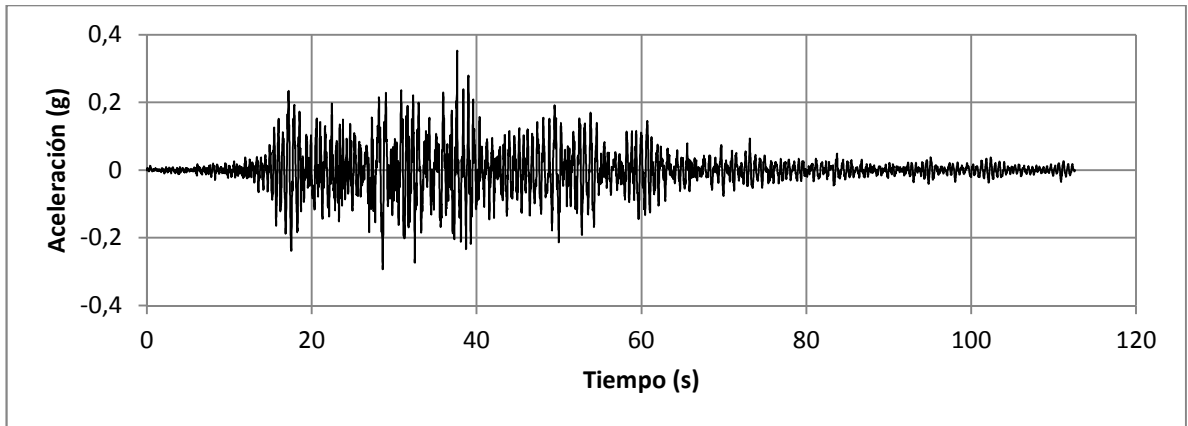
Para el presente estudio de análisis dinámico se seleccionaron tres señales de sismos adicionales, en las cuales se buscaron las siguientes características:

- Diferente contenido frecuencial y amplitud igual o similar (2): la señal de sismo seleccionada con estas características corresponde al sismo de Tarapacá (zona Norte de Chile) ocurrido el 13 de junio de 2005, de Magnitud 7,9 en la escala sismológica de magnitud de momento y a una profundidad de 111 km. El registro de esta señal fue obtenido del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (8).
- Igual contenido frecuencial y con amplitud menor (3): A partir del análisis probabilístico del estudio de amenaza sísmica desarrollado por los ingenieros civiles Mario Álvarez, Tomas Fisher y Rafael Riddell (2002), se determinó que para una probabilidad de excedencia del 50% en 50 años, es decir, un sismo con periodo de retorno medio de 72 años, la aceleración máxima del suelo en la zona de estudio es de 0,23g. Con la aceleración máxima se escaló la señal del sismo de Valparaíso de 1985, obteniendo la señal sísmica con igual contenido frecuencial y con menor amplitud.
- Igual contenido frecuencial y con amplitud mayor (4): A partir del mismo estudio de amenaza sísmica descrito anteriormente, se determinó que para una probabilidad de excedencia del 10% en 100 años, es decir, un sismo con periodo de retorno medio de 949 años, la aceleración máxima del suelo en el sitio de estudio es de 0,41g. Con la aceleración máxima se escaló la señal del sismo de Valparaíso de 1985, obteniendo la señal sísmica con igual contenido frecuencial y con mayor amplitud.

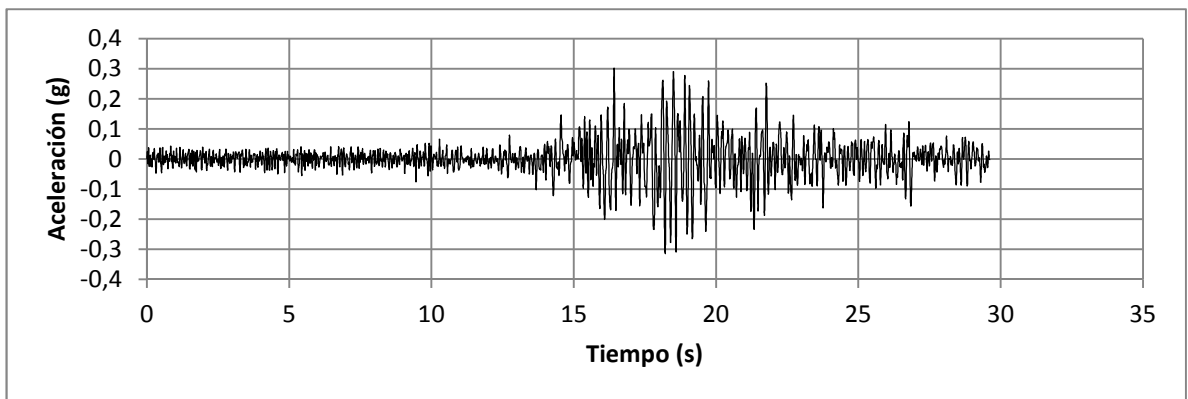
Se decidió utilizar estas cuatro señales en el análisis dinámico, para considerar diferentes efectos dinámicos en el comportamiento de la ladera del Taco 3. Las señales de sismo (1), (2), (3) y (4) se muestran en la Figura 6-22, Figura 6-23, Figura 6-24 y Figura 6-25, respectivamente.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

**Figura 6-22. Señal sísmica Valparaíso 03/03/1985 19:47, Viña del Mar.
Componente 200.**



**Figura 6-23. Señal sísmica Tarapacá 13/06/2005 22:44, Poconchile ETNA, 275
– Componente horizontal.**



**Figura 6-24. Señal sísmica Valparaíso 03/03/1985 19:47, Escalada para una
aceleración máxima de 0,23g – Componente 200.**

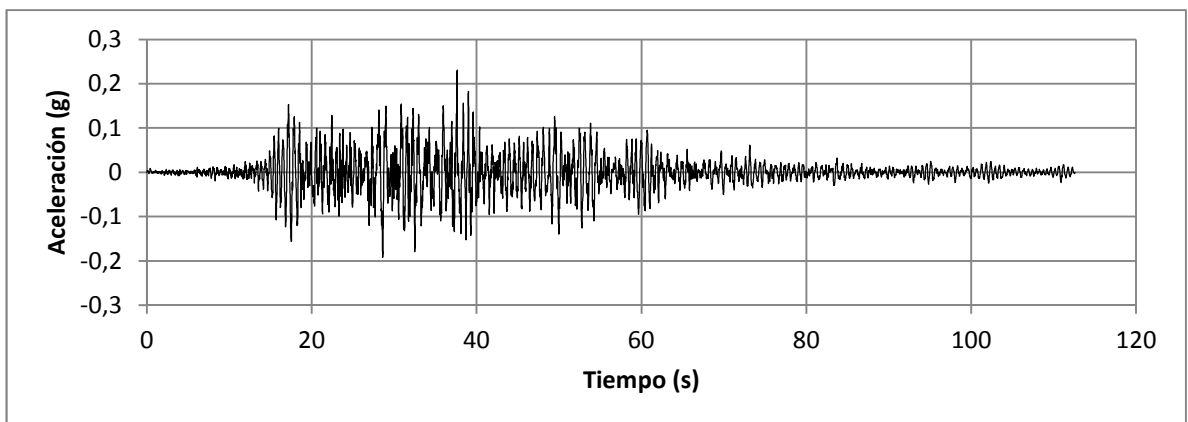
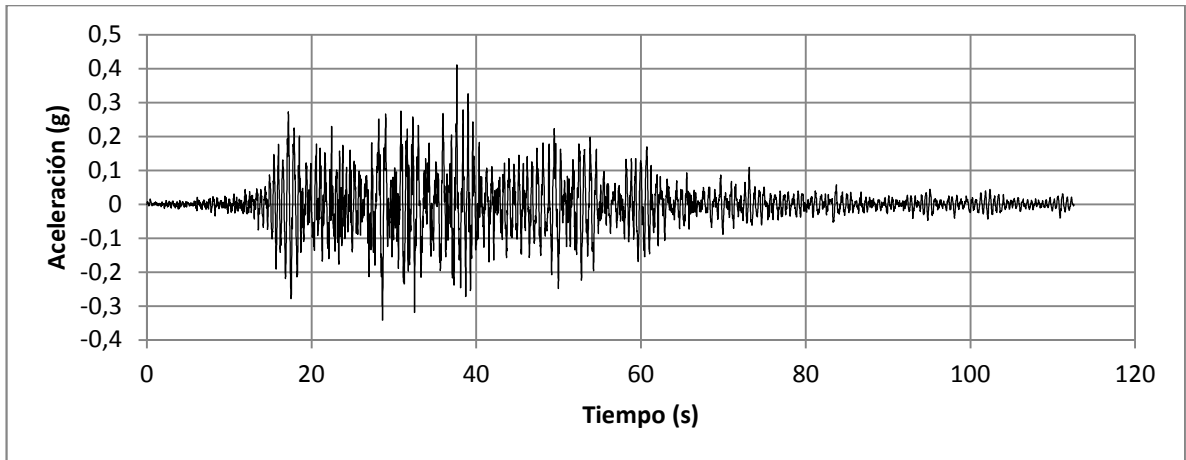


Figura 6-25. Señal sísmica Valparaíso 03/03/1985 19:47, Escalada para una aceleración máxima de 0,41g – Componente 200.



La variación del contenido frecuencial para la señales de sismo de Valparaíso y Tarapacá son típicos de una señal de subducción, cuyo contenido frecuencial se encuentra para picos de aceleración entre de 0,2 y 0,6 segundos. Los espectros de respuesta para las señales de sismo de Valparaíso y Tarapacá se presenta en la Figura 6-26 y Figura 6-27, respectivamente.

Figura 6-26. Espectro de respuesta del sismo Valparaíso (03/03/1985)

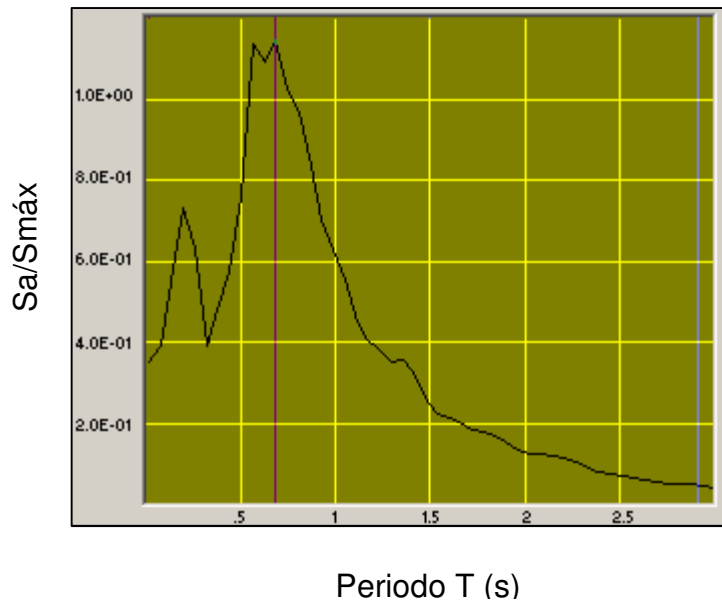
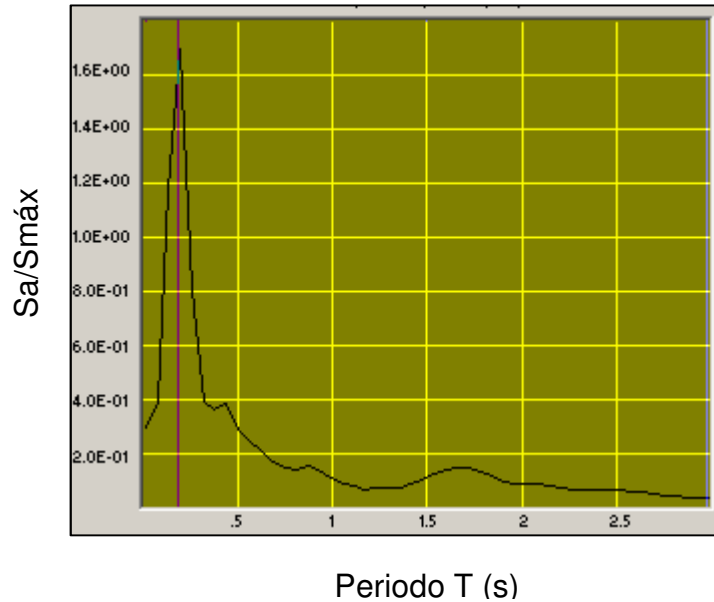


Figura 6-27. Espectro de respuesta del sismo Tarapacá (13/06/2005)



6.6.2 Parámetros dinámicos de los materiales

Los parámetros dinámicos estimados para evaluar el comportamiento de los materiales que conforman el Taco 3, principalmente de los limos lacustres durante un sismo fueron: Relación de módulo cortante G/G_{max} ; amortiguamiento β y la relación de esfuerzo cortante y del número de ciclos necesarios para producir licuación en función de la densidad relativa del material.

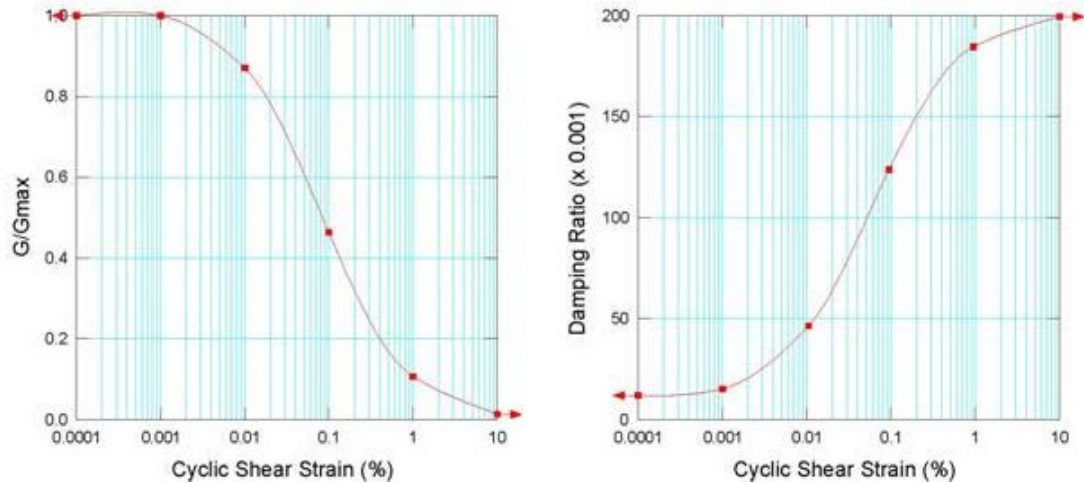
El módulo cortante del suelo se define como la pendiente de la curva de esfuerzo cortante contra deformación angular y varía dependiendo del nivel de deformación en el cual se encuentre el suelo. Así, para un nivel de deformación angular muy pequeño ($1 \times 10^{-4}\%$ aprox.) el suelo presenta el módulo cortante máximo (G_{max}) y a medida que la deformación angular aumenta (hasta valores del 1% aprox.), el módulo de corte disminuye. Este comportamiento se denomina degradación del módulo cortante y es representativo para cada tipo de suelo. El amortiguamiento (β) indica el grado de disipación de la energía aplicada al suelo debido a una carga cíclica.

Para cada uno de los materiales que conforman el Taco 3, fue necesario obtener curvas que relacionen los principales parámetros dinámicos para cada material y de esta manera poder incluir las características dinámicas dentro del modelo numérico. Estas curvas fueron determinadas por el programa QUAKE/W a partir del tipo de material que conforma cada estrato de la ladera del Taco 3, el índice de plasticidad y el esfuerzo por confinamiento.

El procedimiento que utiliza QUAKE/W para estimar la función de reducción del módulo cortante (G/G_{max}) es el desarrollado Zhang (Zhang et al, 2005). El modelo

constitutivo corresponde a un modelo equivalente y el amortiguamiento es variable en función de las deformaciones cíclicas. (Véase Figura 6-28).

Figura 6-28. Funciones de módulo de corte normalizado y relación de amortiguamiento del material (Zhang et al, 2005)

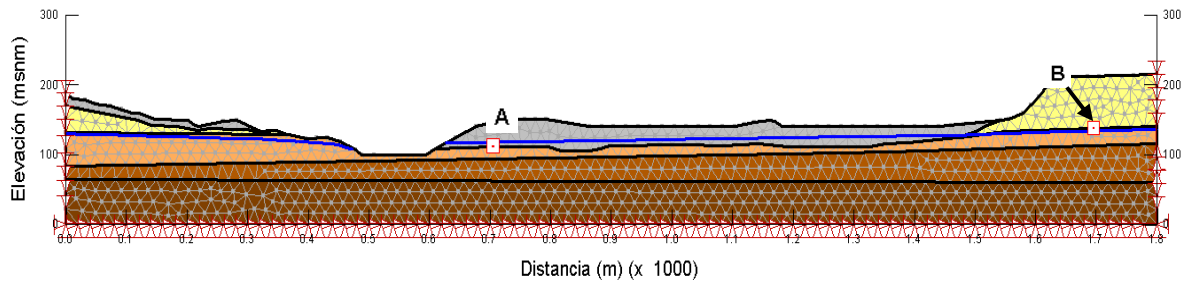


6.6.3 Análisis dinámico – Esfuerzos y deformaciones

En este método de análisis es necesario evaluar en primer lugar los esfuerzos actuantes en la estructura antes de la acción del sismo. El programa QUAKE/W[®] utilizando un modelo elástico lineal para cada uno de los materiales que conforman la ladera del Taco 3, determina los esfuerzos cortantes.

Se debe considerar que la ladera del Taco 3 después de los movimientos ocurridos el 22 de Mayo de 1960 ocupa una distancia de aproximadamente 2 km, lo cual genera que la modelación sea más compleja dada la magnitud de la sección. Por tanto, para poder realizar el análisis de esta sección se definieron elementos finitos triangulares de 20 m, que se consideran bastante grandes y abarcan un gran volumen de suelo. En la Figura 6-29 se presenta la malla por elementos finitos utilizados para modelar la ladera.

Figura 6-29. Modelo del análisis dinámico



Como primer paso para la modelación se estableció el estado tensional de la ladera antes de la aplicación del sismo, esto se realizó con un análisis de tipo estático inicial con el programa QUAKE/W[®], que calcula las deformaciones por gravedad una vez haya finalizado cada uno de los incrementos del nivel del río definidos en el análisis de flujo.

Posteriormente, se aplicó cada uno de los registros de aceleración para evaluar la respuesta sísmica realizando un análisis bidimensional de respuesta dinámica. El programa QUAKE/W[®] utiliza los esfuerzos estáticos calculados en el análisis de tipo estático inicial para determinar el módulo de corte dinámico en cada elemento y emplea el método de Newmark para lograr la integración de la ecuación de movimiento en el tiempo. La respuesta dinámica se calculó para las cuatro señales de sismo seleccionadas.

A continuación se presenta los resultados obtenidos a partir del análisis dinámico anteriormente descrito.

6.6.3.1 Resultados análisis dinámico de la ladera del Taco 3

Para el análisis dinámico en la ladera del Taco 3, se establecieron dos nodos (nodos históricos) a través del tiempo, uno cerca al cauce del río San Pedro (Punto A) y el otro dentro del escarpe principal (Punto B), tal y como se presentan en la Figura 6-29.

Los resultados de los esfuerzos efectivos y desplazamientos del análisis dinámico se presentan de la Figura 6-30 a la Figura 6-101. Los iso-contornos tanto de esfuerzos efectivos como de desplazamientos, se presentan para el tiempo en el cual se da la aceleración pico para cada registro sísmico analizado.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-30. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso Primer incremento del nivel del río San Pedro

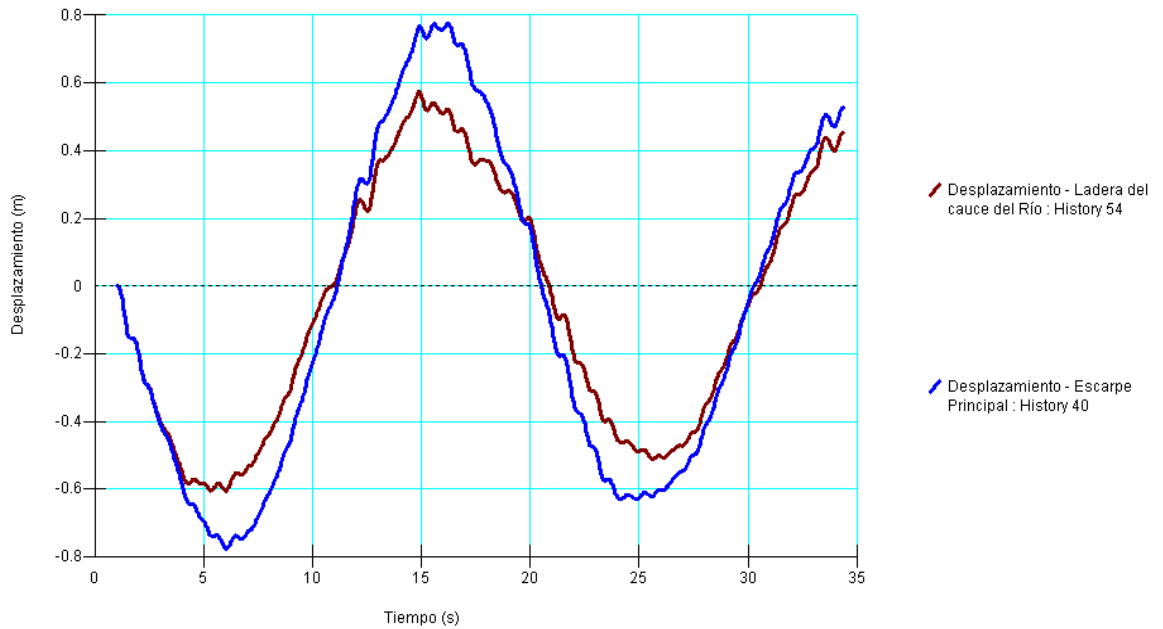
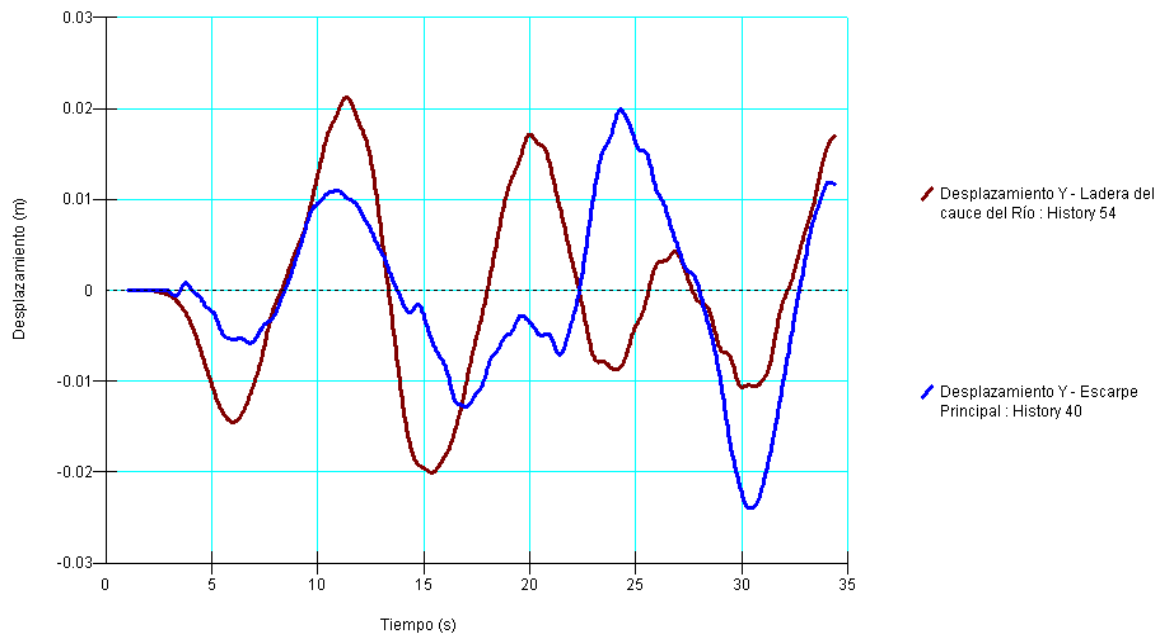


Figura 6-31. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-32. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Primer incremento del nivel del río San Pedro

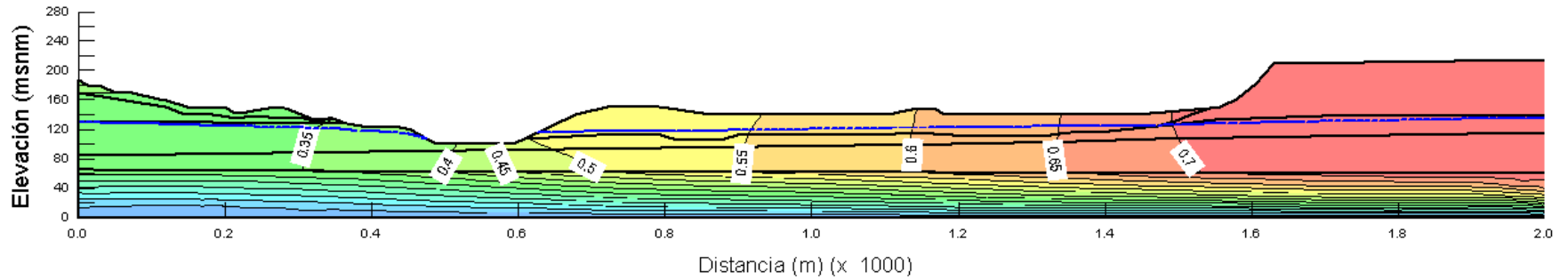
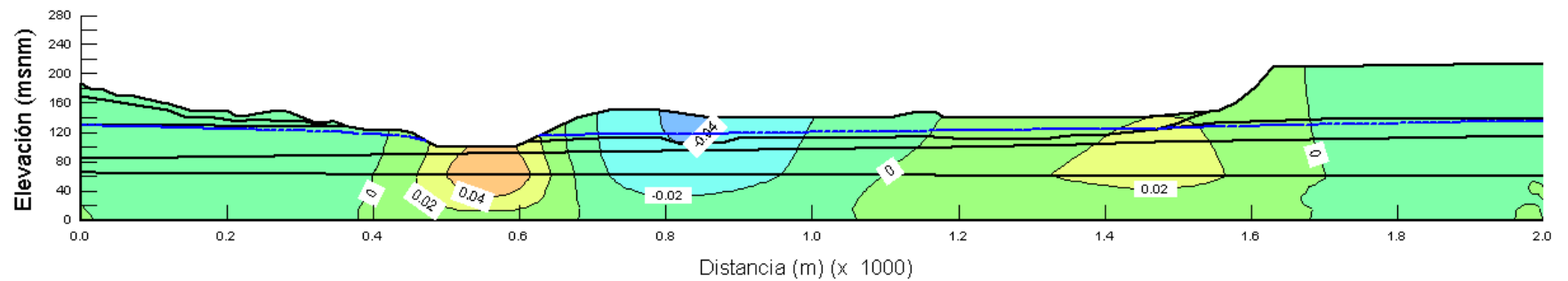


Figura 6-33. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-34. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Primer incremento del nivel del río San Pedro

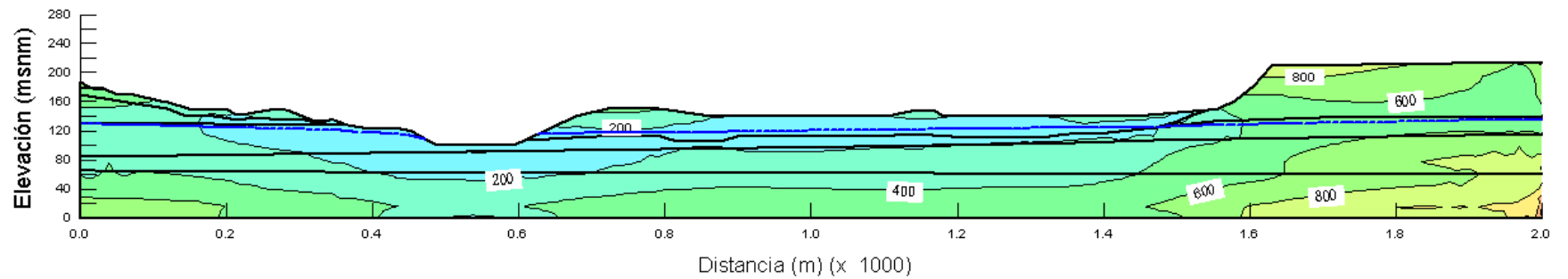
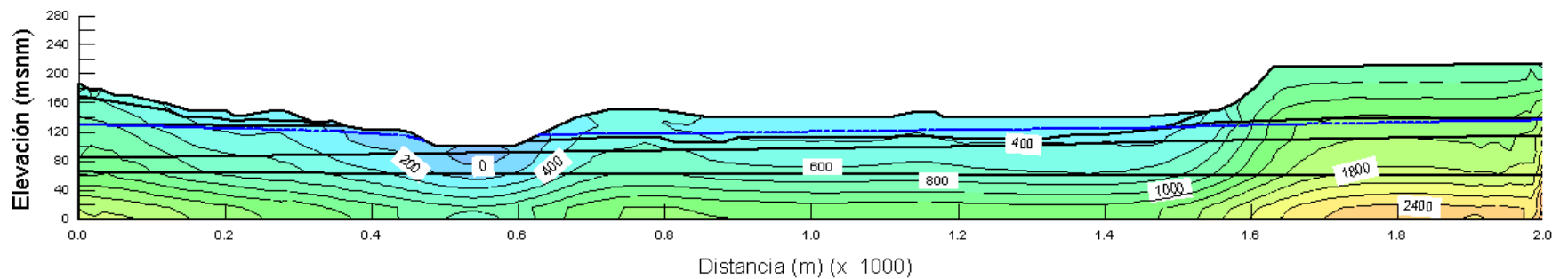


Figura 6-35. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-36. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso. Segundo incremento del nivel del río San Pedro

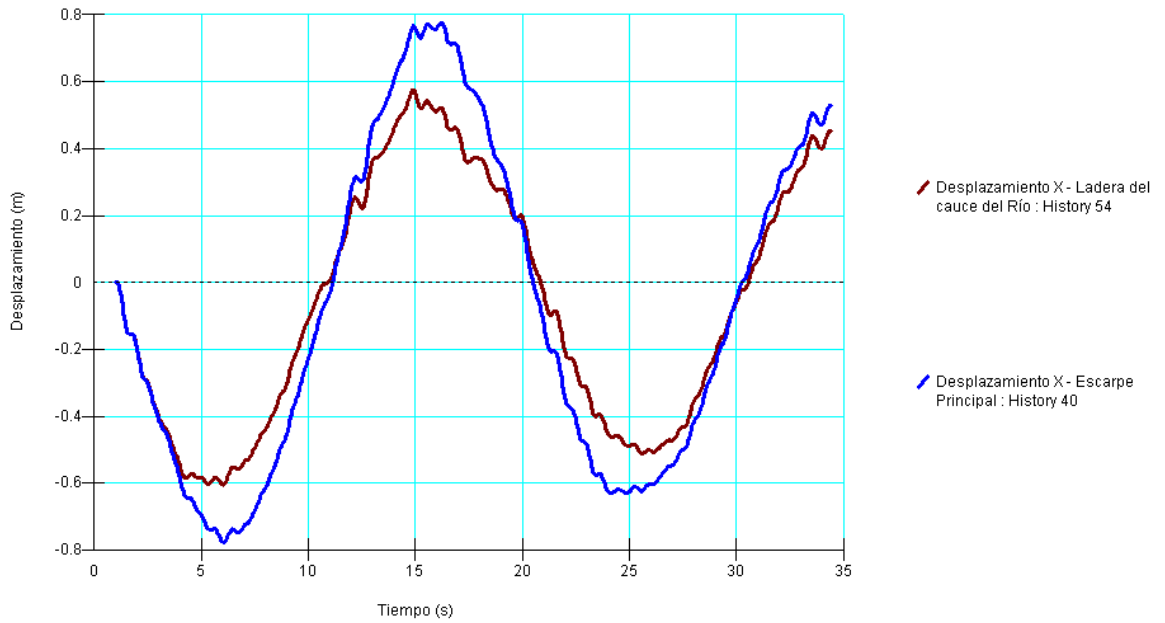
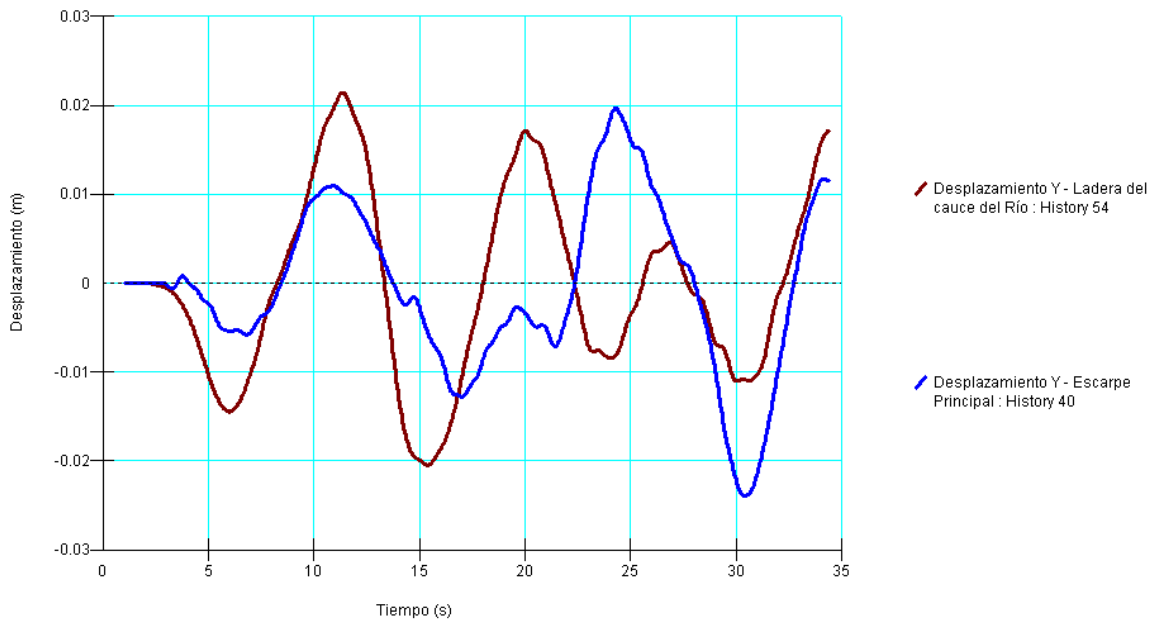


Figura 6-37. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso. Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-38. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Segundo incremento del nivel del río San Pedro

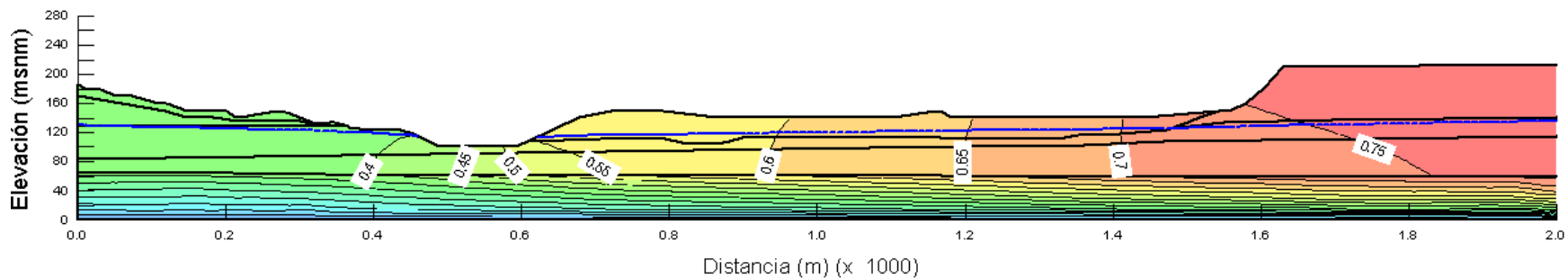
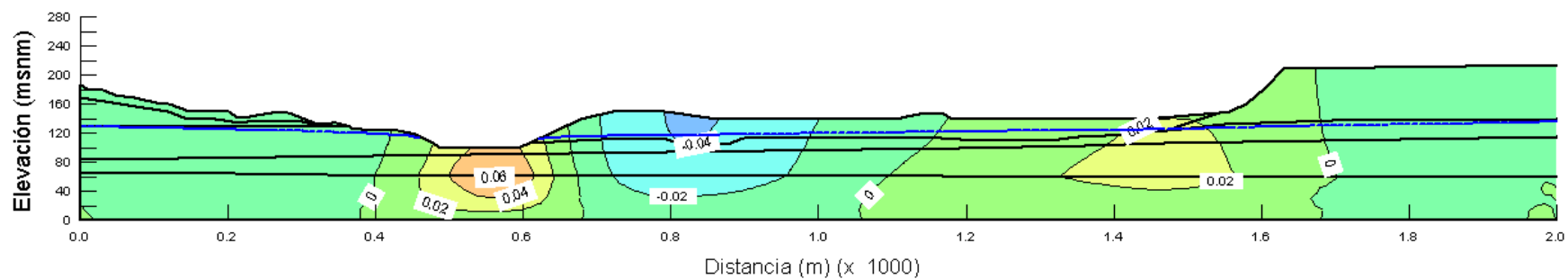


Figura 6-39. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-40. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Segundo incremento del nivel del río San Pedro

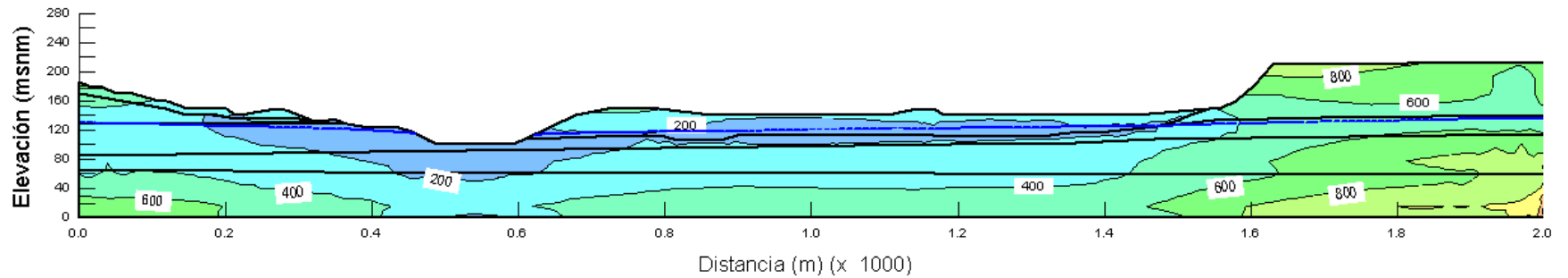
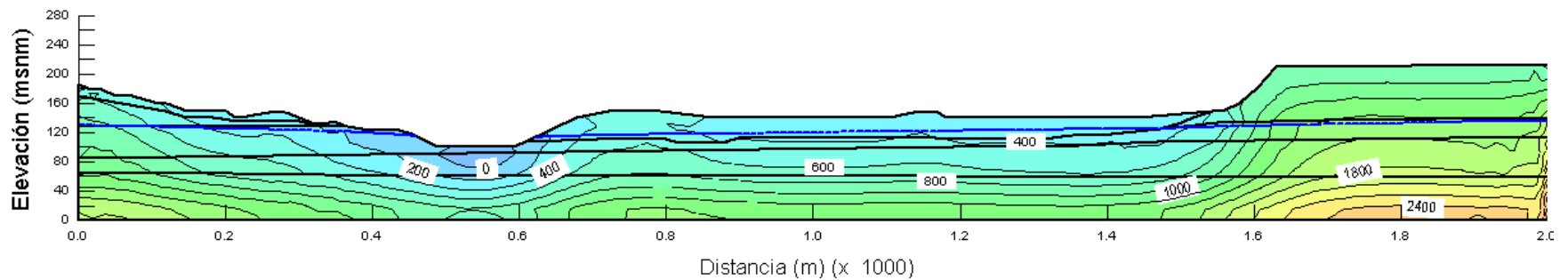


Figura 6-41. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-42. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso. Tercer incremento del nivel del río San Pedro

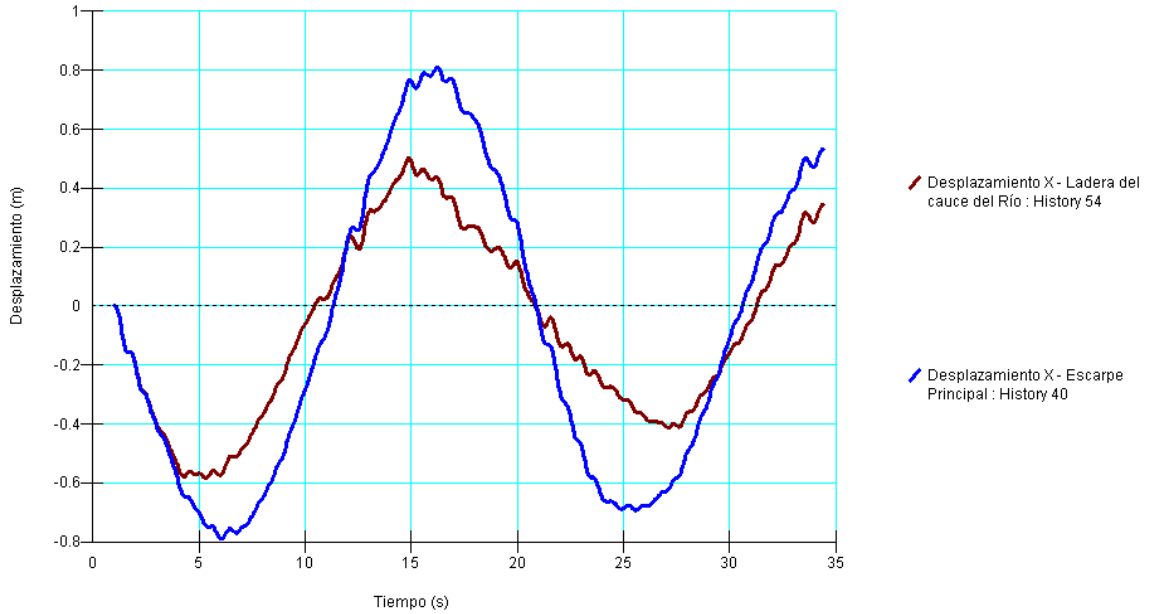
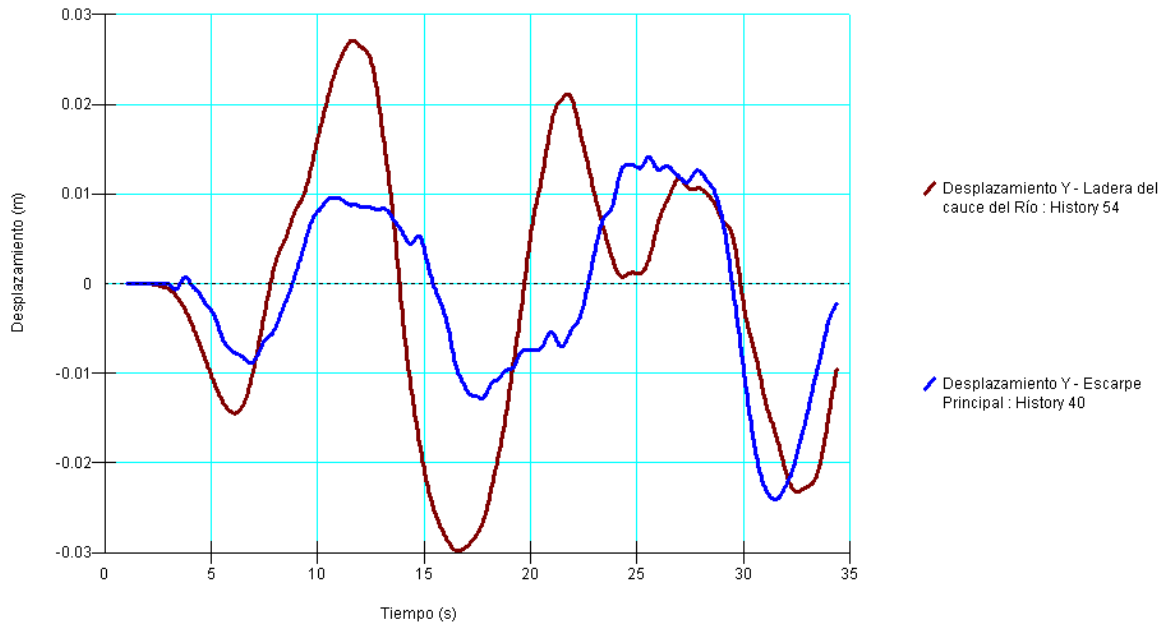


Figura 6-43. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso. Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-44. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

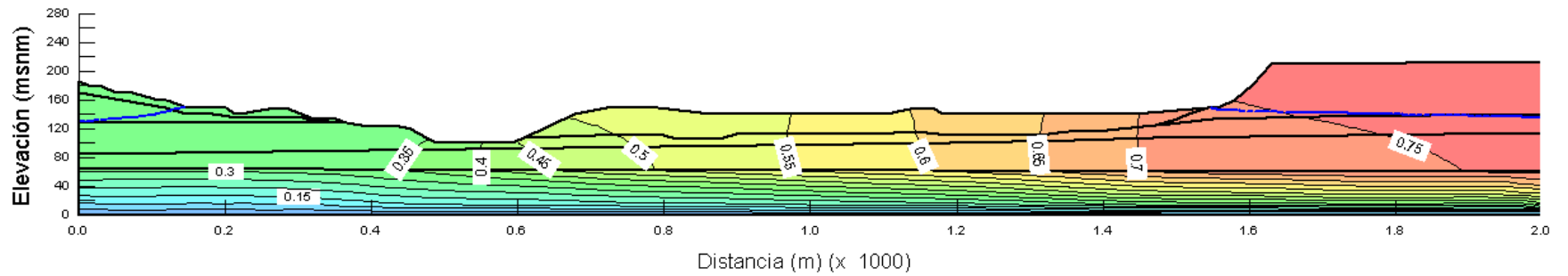
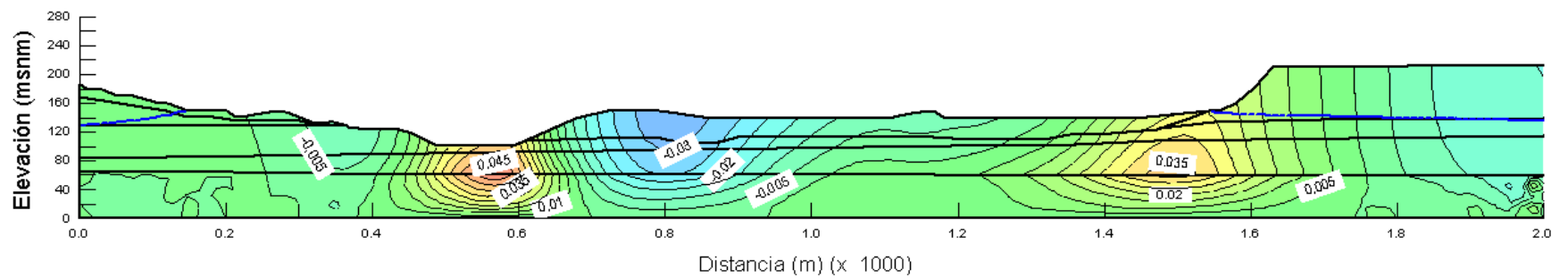


Figura 6-45. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-46. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

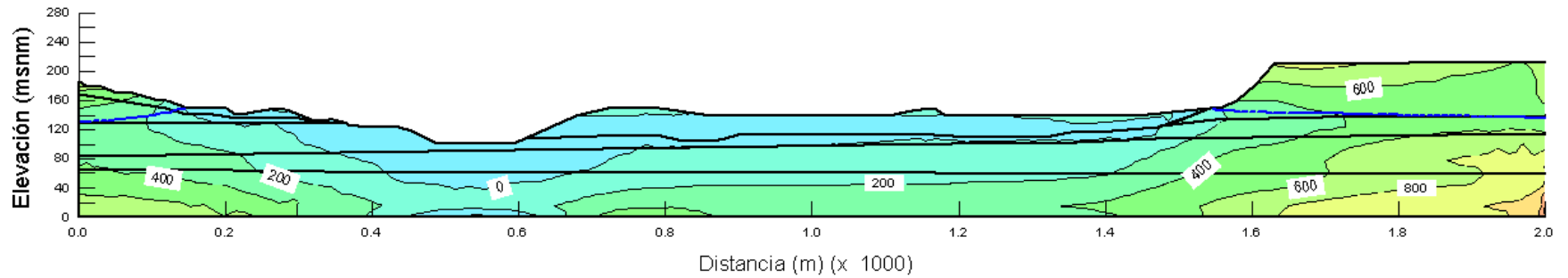
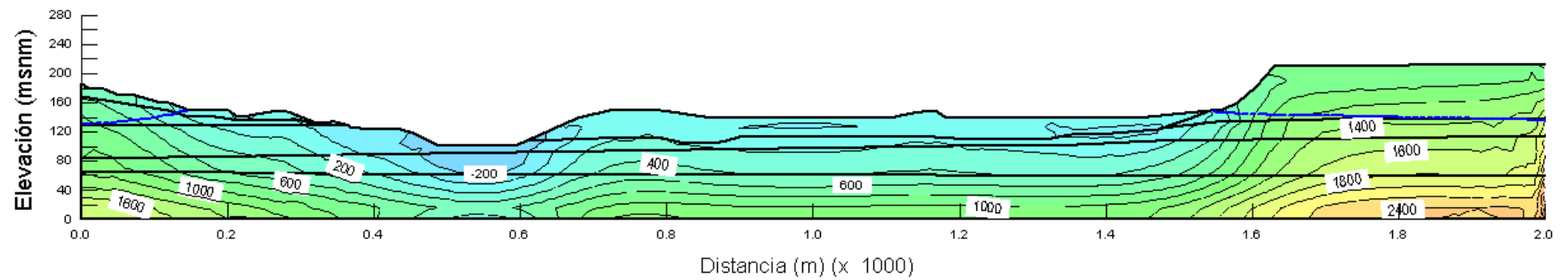


Figura 6-47. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso - Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Respuesta dinámica Señal Sismo Valparaíso

De los resultados presentados anteriormente, se describen las siguientes observaciones:

- En el primer incremento se observan esfuerzos efectivos horizontales del orden de 200 kPa en la zona del cauce y de 600 a 800 kPa sobre el escarpe principal. Al aumentar el nivel de agua se observan que los esfuerzos efectivos horizontales en el cauce son nulos, incrementando la probabilidad de deslizamientos.
- Para los esfuerzos efectivos verticales durante el primer y segundo incremento se mantienen los mismos valores al interior de la ladera. Pero para el tercer incremento del nivel de agua del río San Pedro los esfuerzos verticales se disminuyen considerablemente, obteniendo valores negativos (-200 kPa) en la base del cauce y en cercanías al escarpe principal, pasando de valores de 400 kPa para el primer y segundo incremento a 200 kPa para el tercer incremento. Reduciéndose la resistencia al corte de los materiales por el grado de saturación.
- De igual forma, la variación de los esfuerzos efectivos tanto horizontales como verticales durante la excitación sísmica, en comparación con el análisis estático inicial, no fue considerable y mantiene el mismo comportamiento en función a su distribución dentro del cuerpo de la ladera.
- En cuanto a desplazamientos en dirección X, estos presentan su menor valor en cercanías al cauce y va aumentando gradualmente hacia el escarpe principal, presentando un valor máximo de 70 cm. Las variaciones observadas en los desplazamientos horizontales con cada cambio del nivel de agua son mínimas.
- Para el primer y segundo incremento del nivel del río San Pedro los desplazamientos en sentido Y presentan valores menores en cercanías al escarpe principal y valores mayores hacia la parte del cauce, con un levantamiento máximo de 6 cm sobre la base del cauce del río San Pedro. Mientras que para el tercer incremento se observa una mayor concentración de movimientos a lo largo de toda la ladera, aunque conserva el mismo orden de magnitud que las simulaciones anteriores. Tal efecto, es debido a la sobrecarga constante que ejerce el agua en toda la ladera por el aumento del nivel del embalse en el tercer incremento.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-48. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Tarapacá. Primer incremento del nivel del río San Pedro

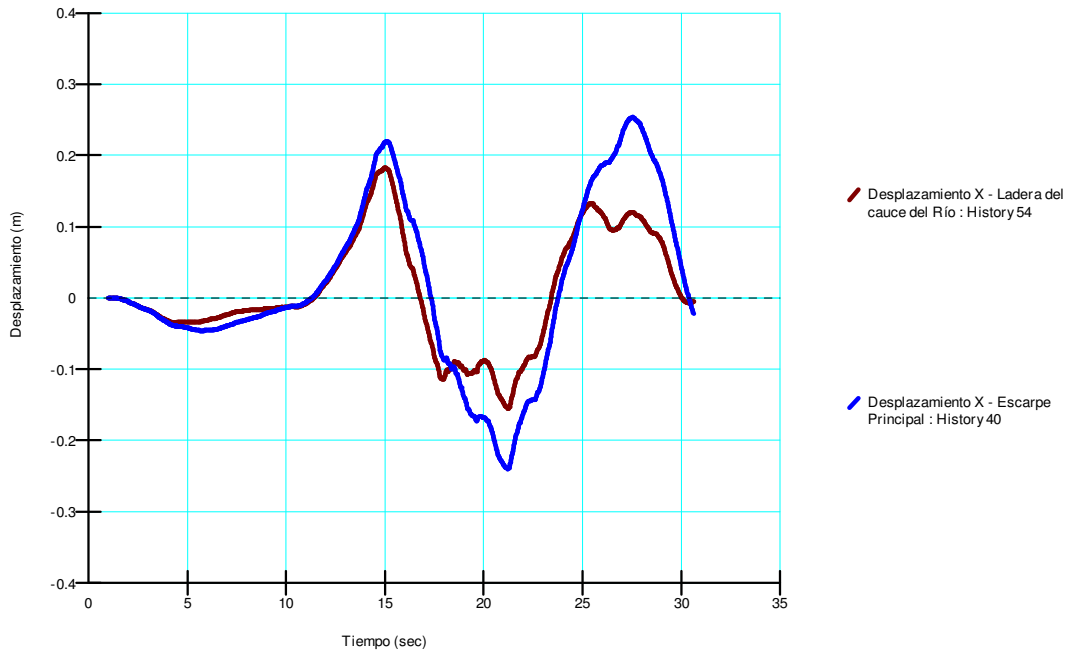
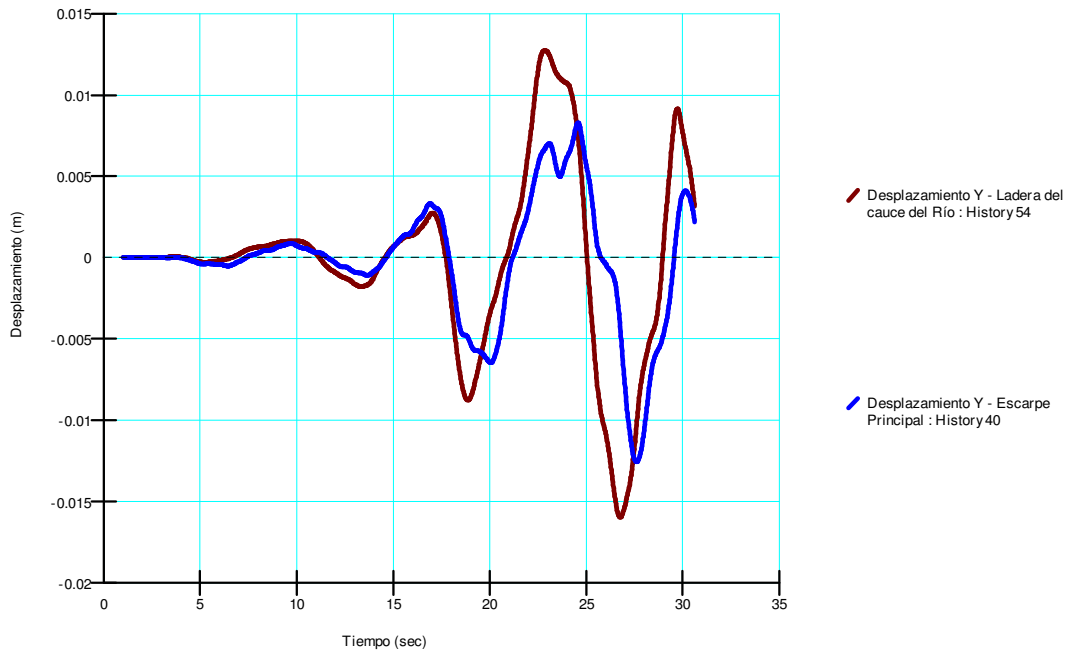


Figura 6-49. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Tarapacá. Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-50. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Primer incremento del nivel del río San Pedro

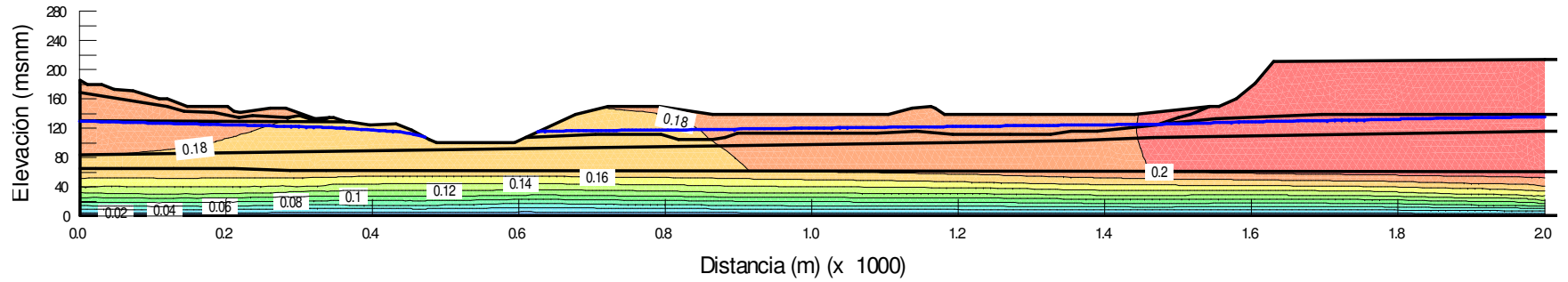
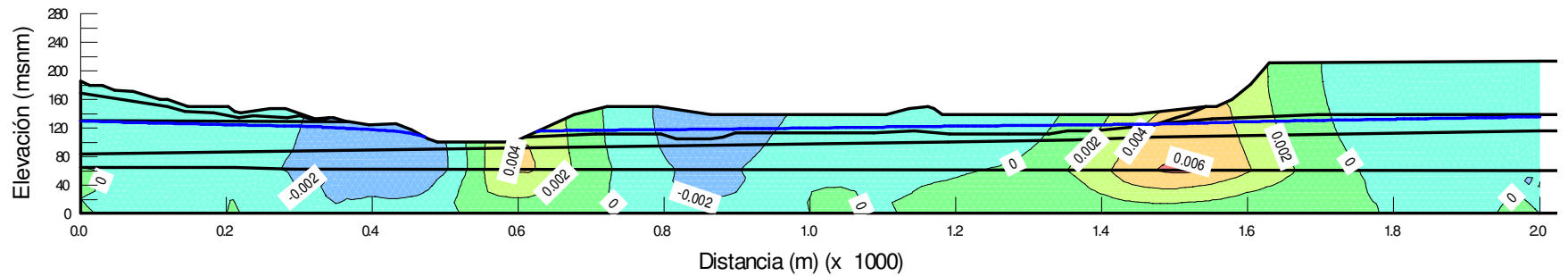


Figura 6-51. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-52. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Primer incremento del nivel del río San Pedro

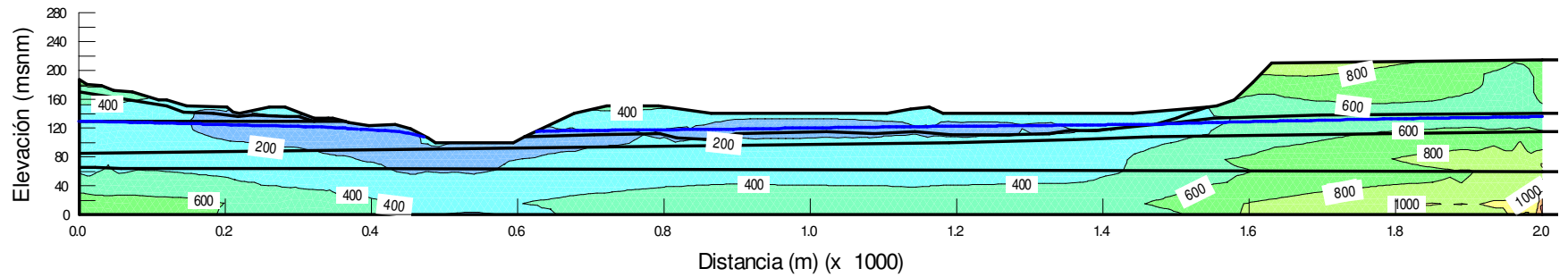
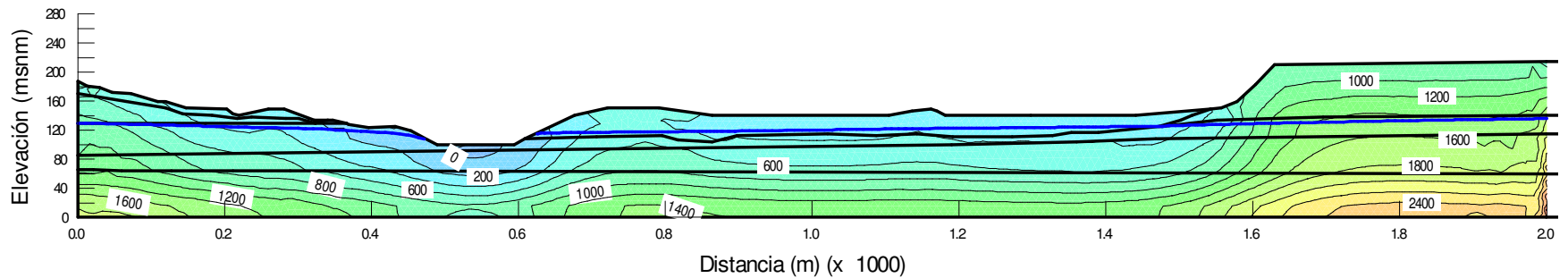


Figura 6-53. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-54. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Tarapacá. Segundo incremento del nivel del río San Pedro

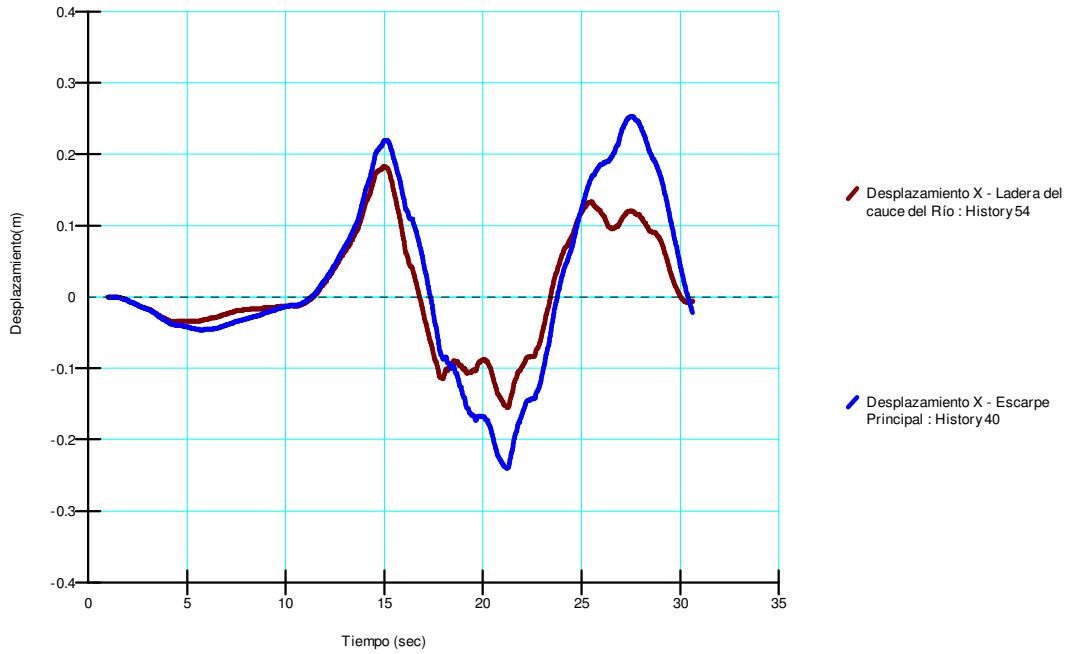
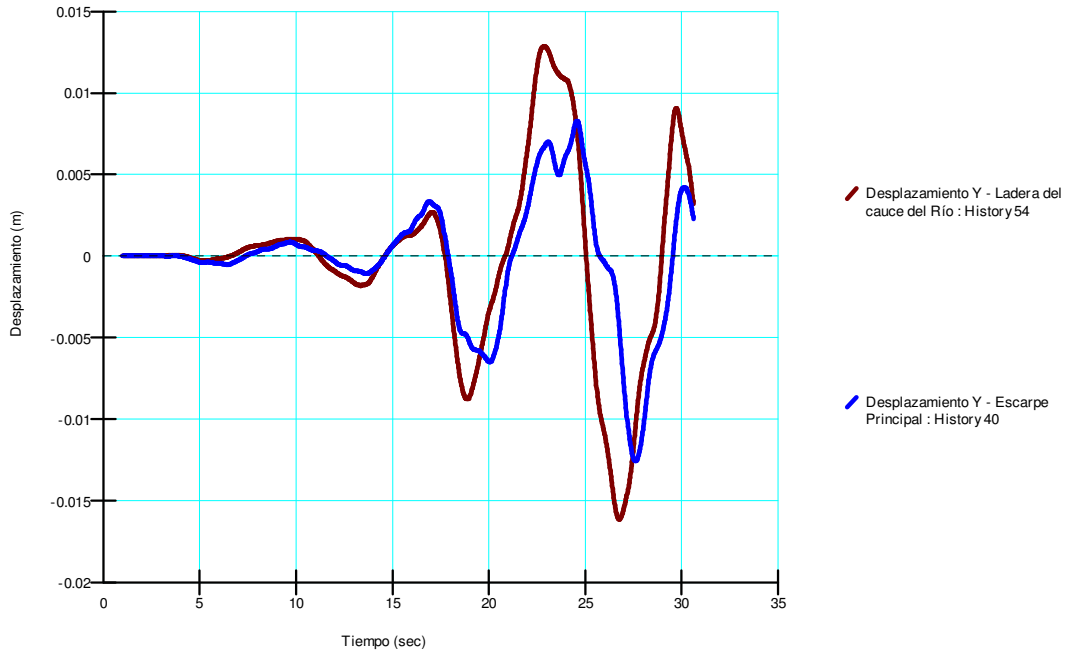


Figura 6-55. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Tarapacá. Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-56. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Segundo incremento del nivel del río San Pedro

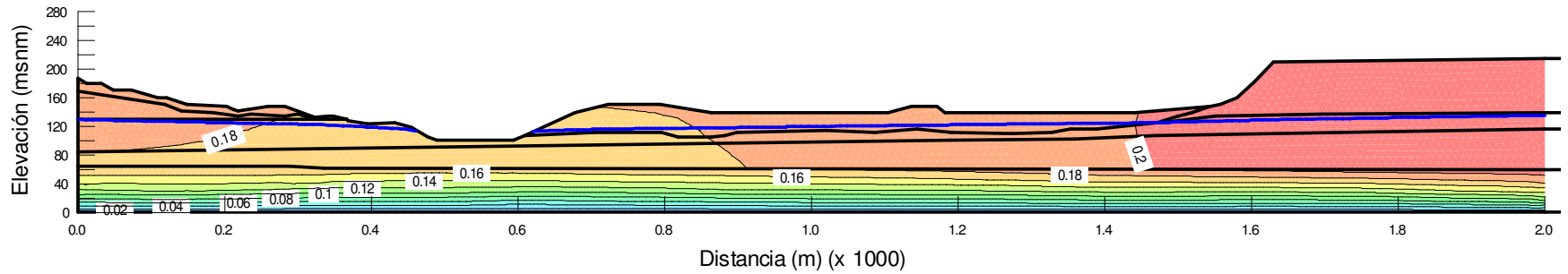
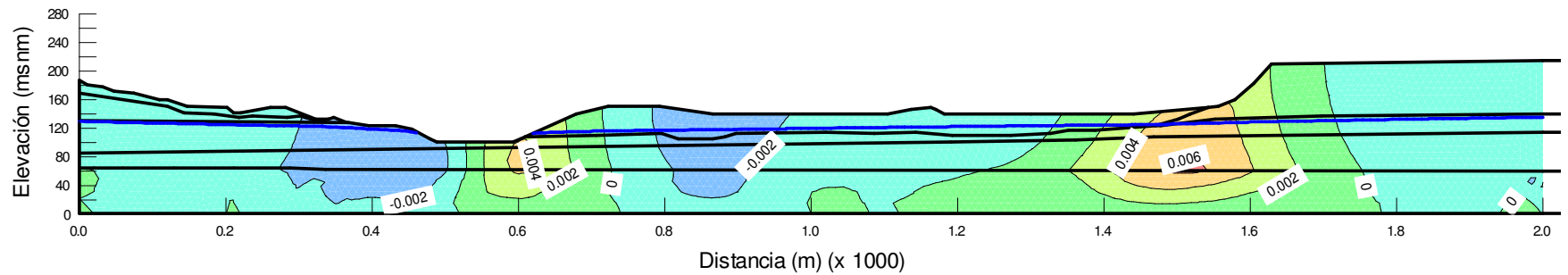


Figura 6-57. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-58. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Segundo incremento del nivel del río San Pedro

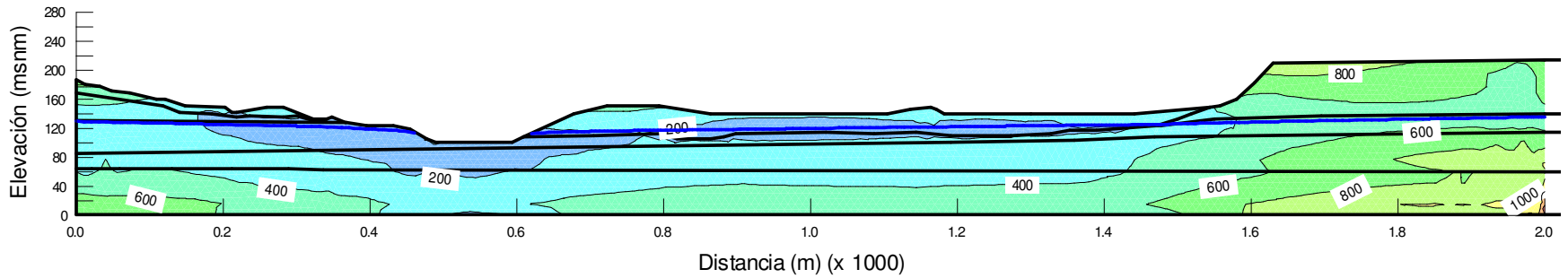
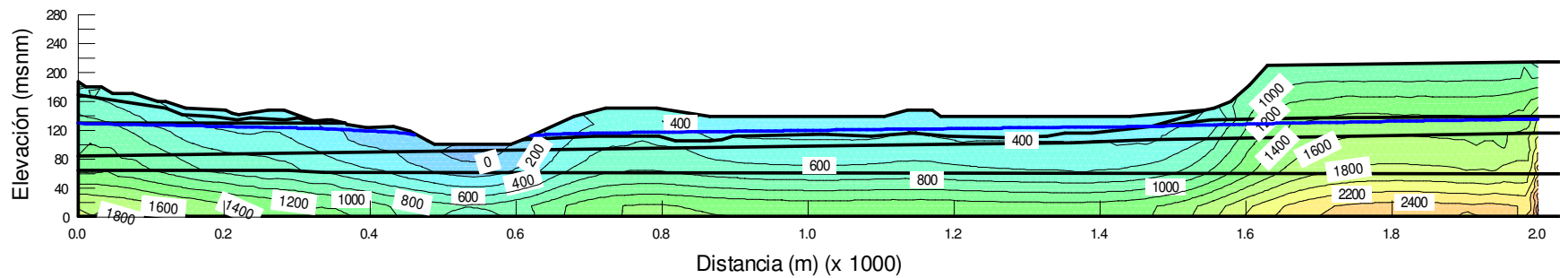


Figura 6-59. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-60. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Tarapacá. Tercer incremento del nivel del río San Pedro

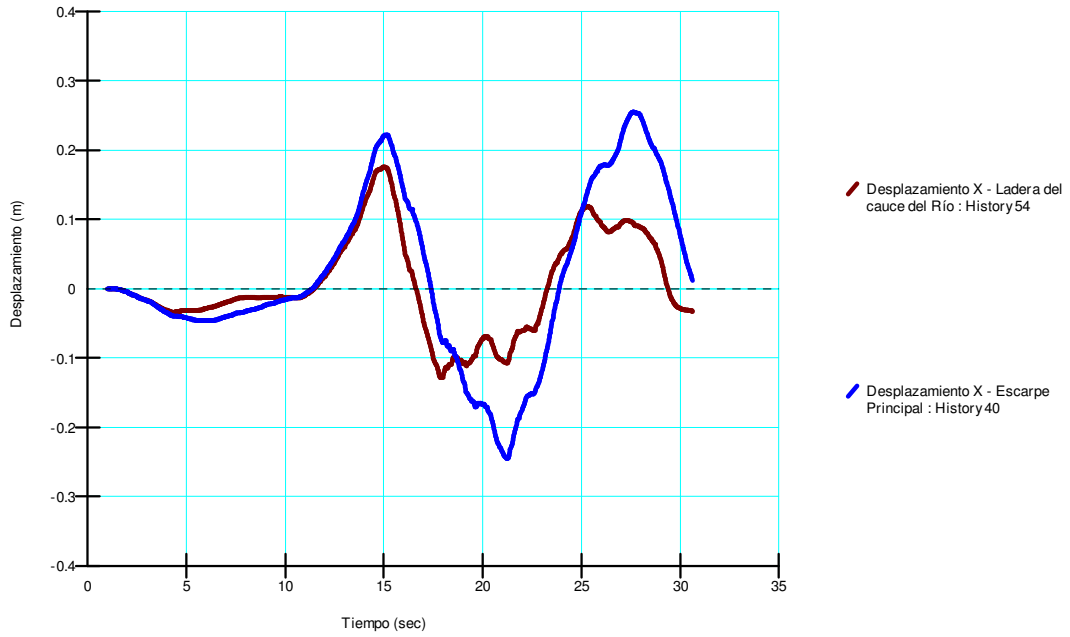
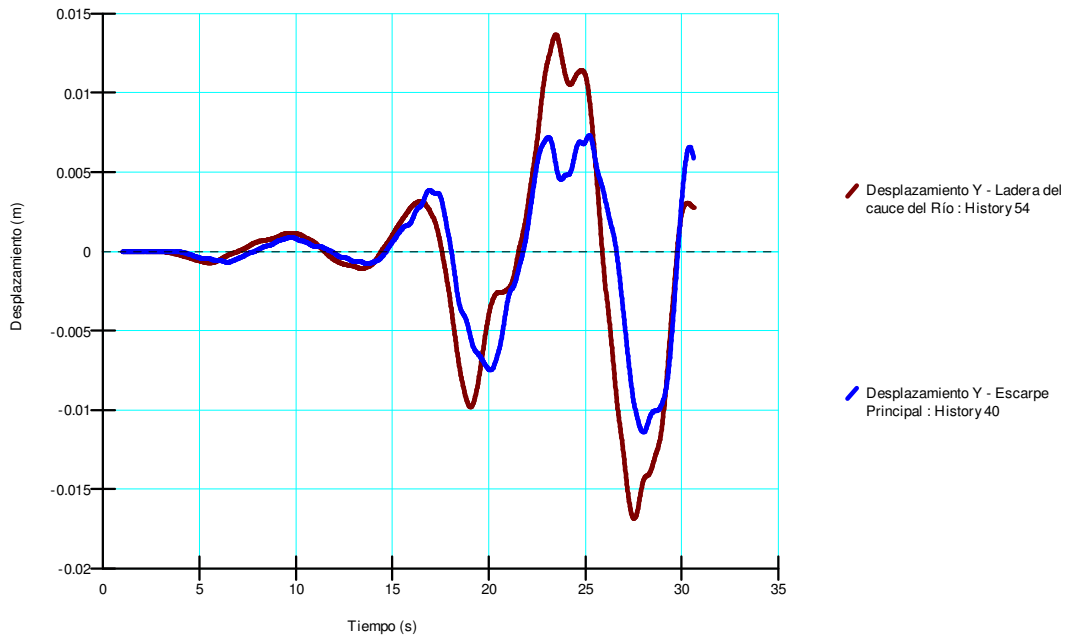


Figura 6-61. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Tarapacá. Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-62. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

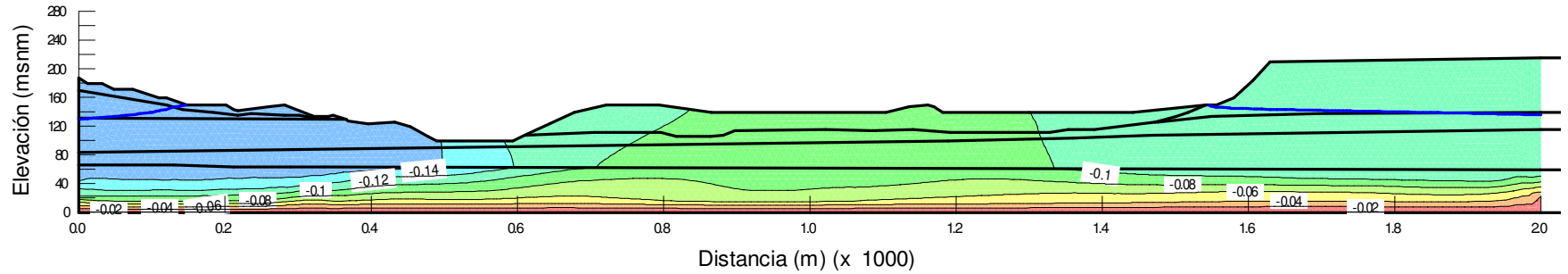
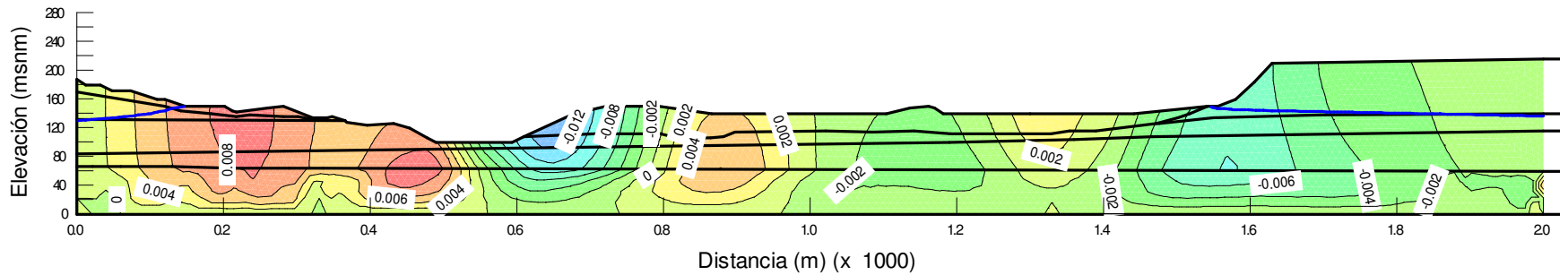


Figura 6-63. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-64. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

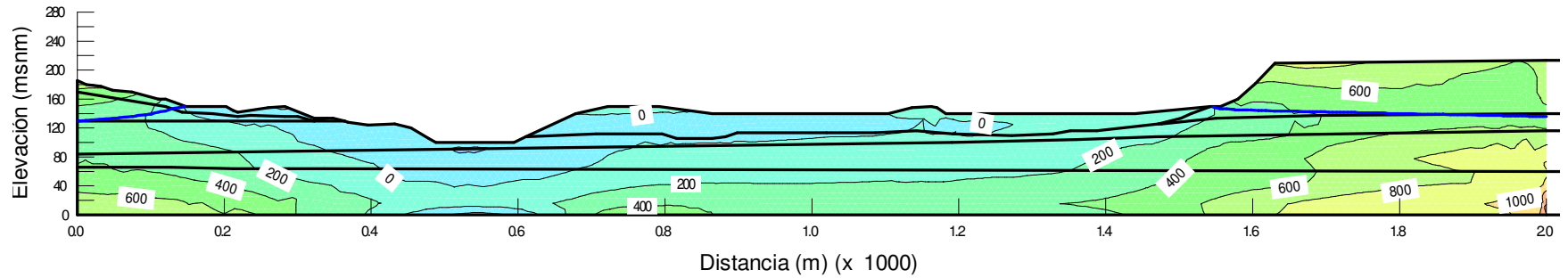
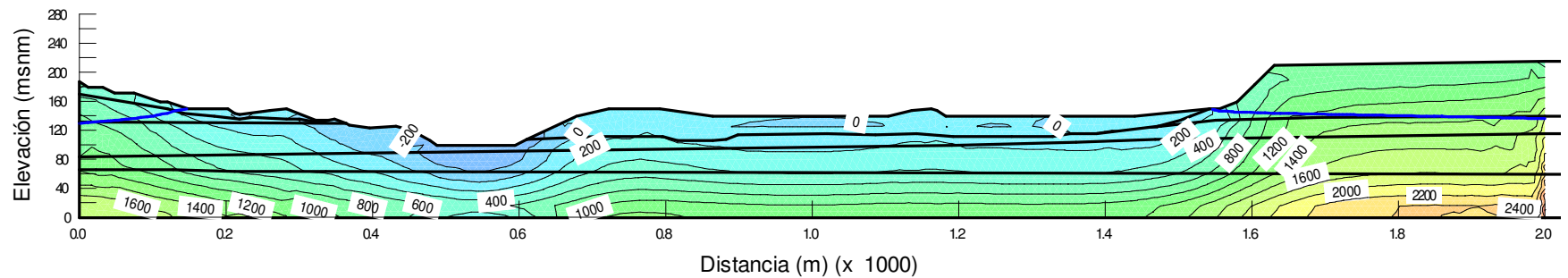


Figura 6-65. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Tarapacá - Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Respuesta dinámica Señal Sismo Tarapacá

De los resultados obtenidos se observó que:

- El comportamiento de los esfuerzos efectivos en los tres cambios del régimen de flujo es muy similar al comportamiento descrito para la señal del sismo Valparaíso. Con valores del orden de 200 kPa a 400 kPa en la zona del cauce y de 800 a 1000 kPa sobre el escarpe principal para los esfuerzos efectivos horizontales durante el primer incremento del nivel del río. Al aumentar el nivel de agua se observan que los esfuerzos efectivos horizontales en el cauce son nulos y hacia el escarpe los esfuerzos se reducen un poco.
- Para los esfuerzos efectivos verticales durante el primer y segundo incremento se mantienen los mismos valores al interior de la ladera. Pero en el tercer incremento del nivel de agua los esfuerzos verticales se disminuyen considerablemente, obteniendo valores negativos (-200 kPa) en la base del cauce y en cercanías al escarpe principal, pasando de valores de 400 kPa para el primer y segundo incremento a 0 kPa para el tercer incremento. Reduciéndose la resistencia al corte de los materiales por el grado de saturación.
- De igual forma, la variación de los esfuerzos efectivos en comparación con el análisis estático inicial, mantiene el mismo comportamiento en función a su distribución.
- Este sismo genera las menores deformaciones horizontales sobre la ladera, con desplazamientos horizontales máximos de 20 cm. En cuanto a las variaciones respecto a los cambios en el régimen de flujo son mínimas y se podría decir que son constantes.
- En cuanto a desplazamientos en dirección Y, estos presentan un comportamiento similar a los valores registrados para la señal sísmica Valparaíso. Con un valor máximo de 6 cm sobre el pie del escarpe principal.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-66. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala menor. Primer incremento del nivel del río San Pedro

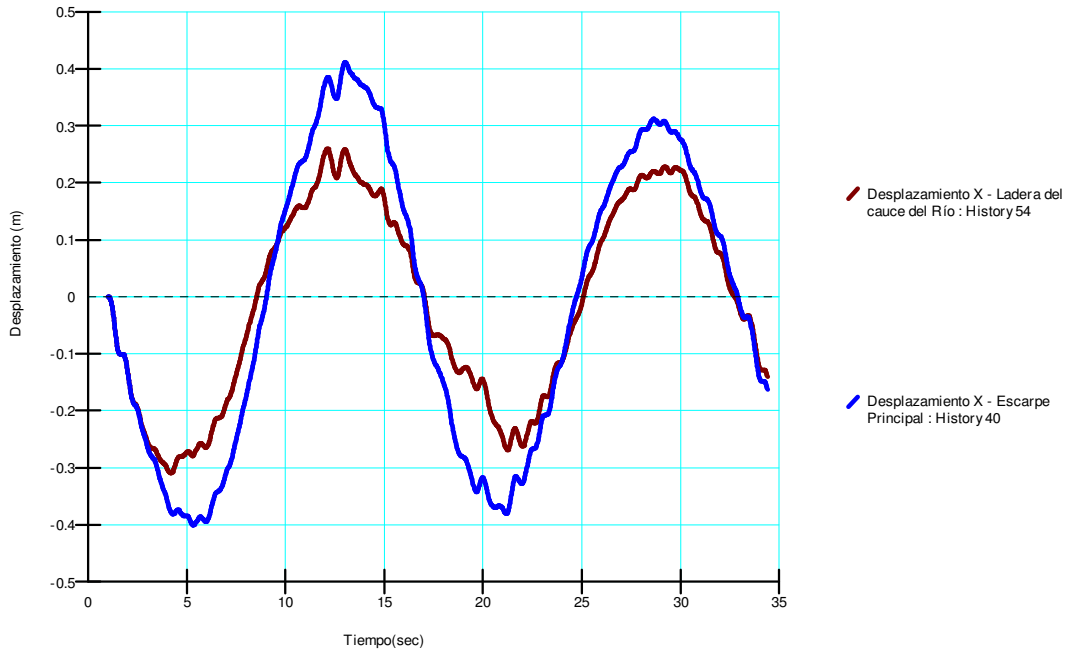
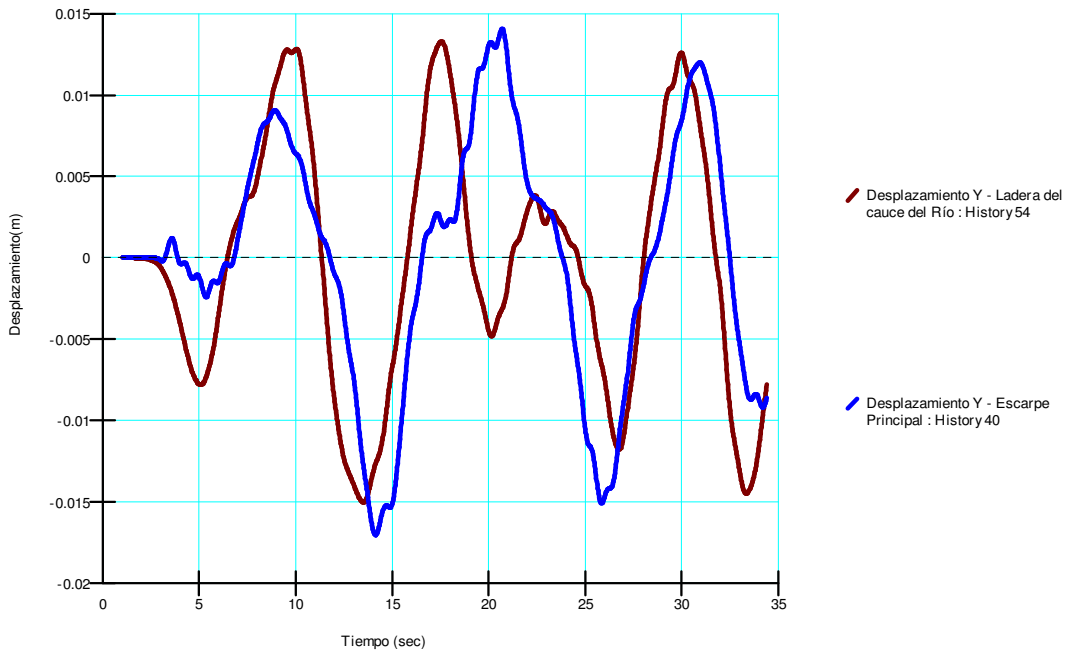


Figura 6-67. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala menor. Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-68. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Primer incremento del nivel del río San Pedro

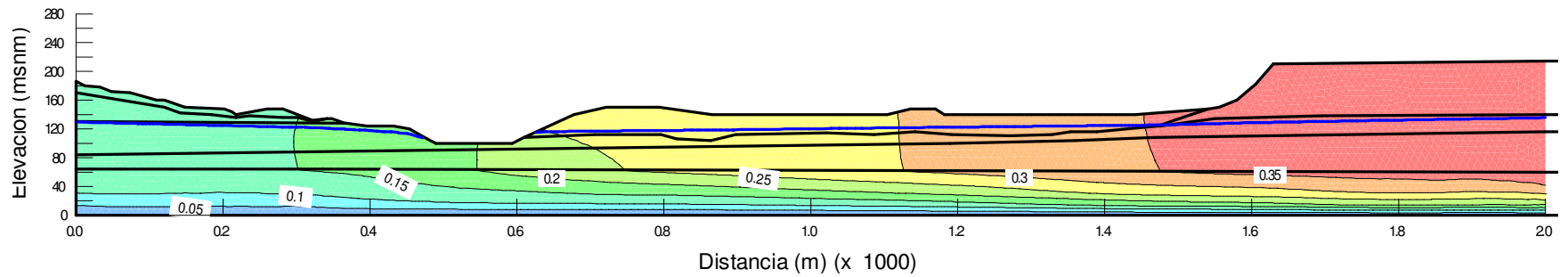
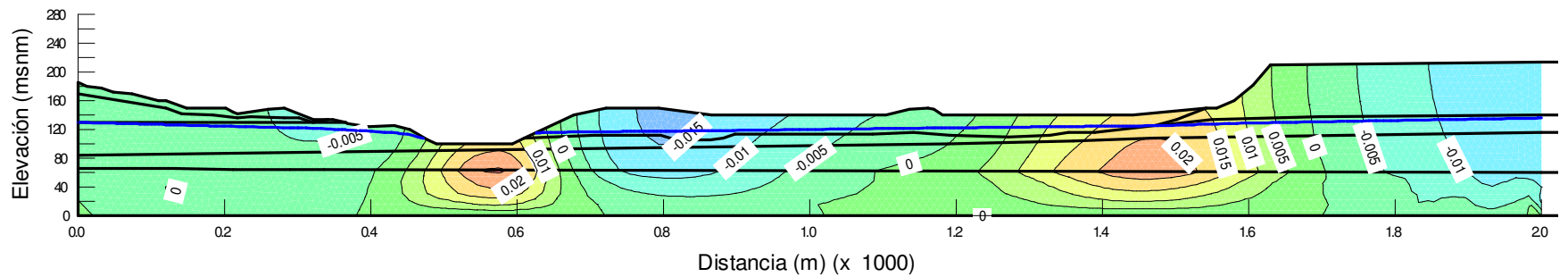


Figura 6-69. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-70. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Primer incremento del nivel del río San Pedro

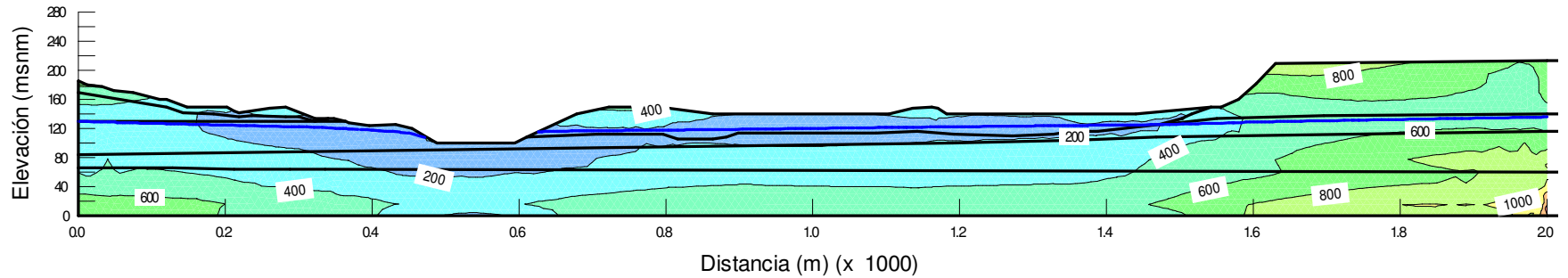
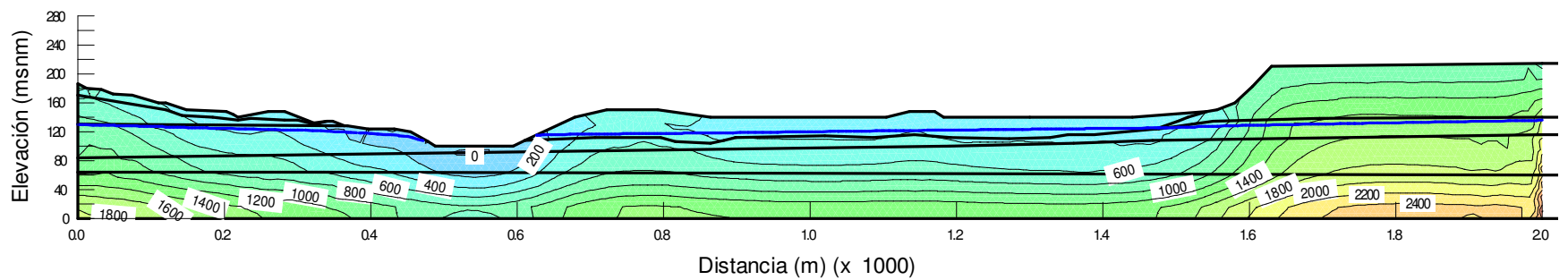


Figura 6-71. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-72. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala menor. Segundo incremento del nivel del río San Pedro

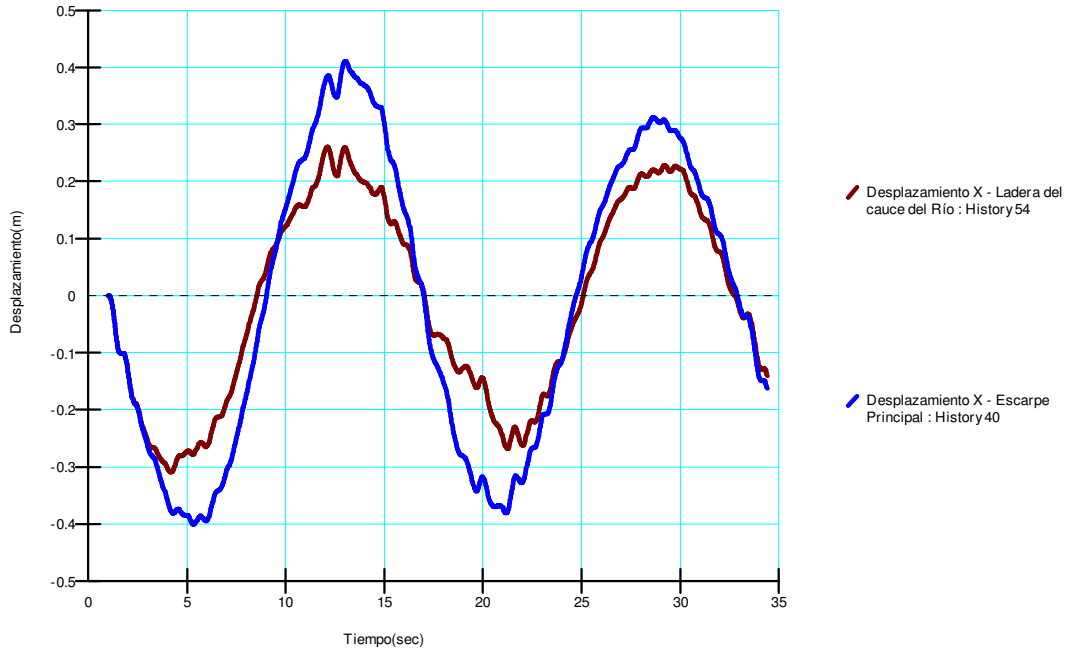
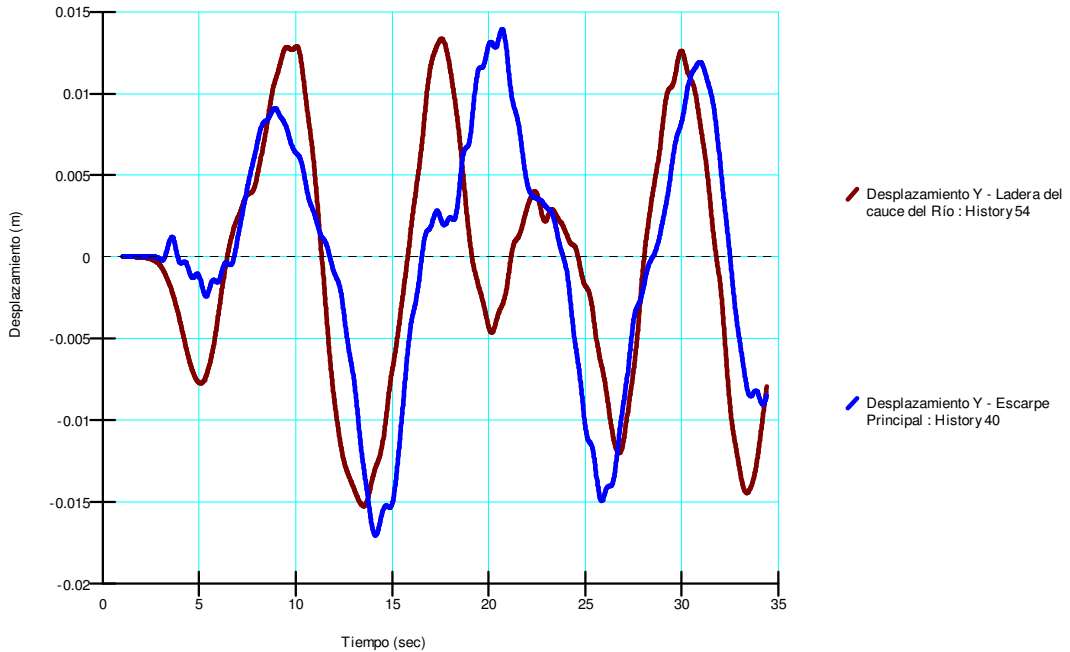


Figura 6-73. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala menor. Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-74. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro

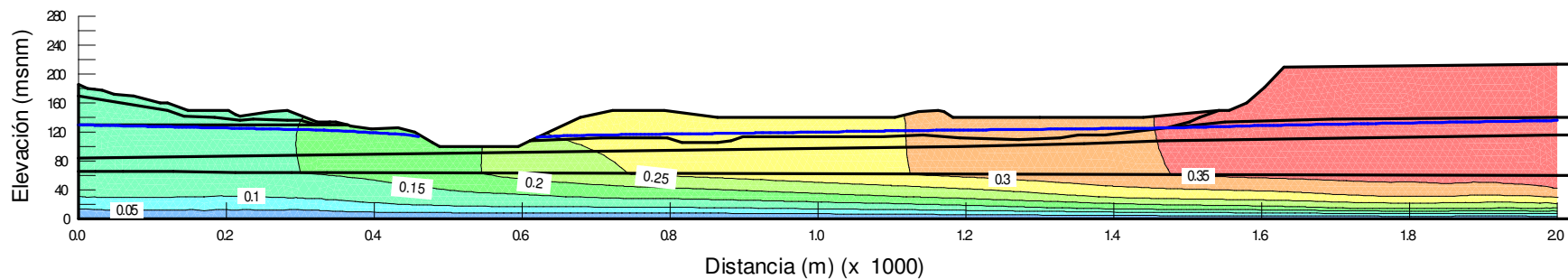
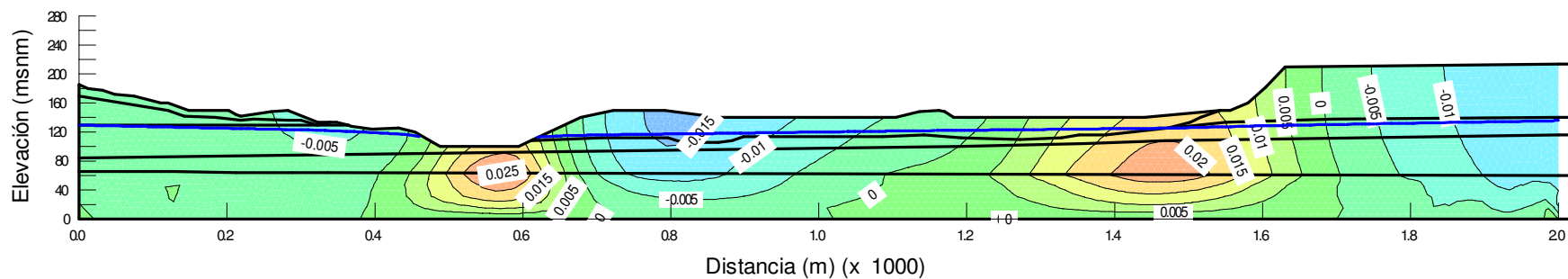


Figura 6-75. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-76. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro

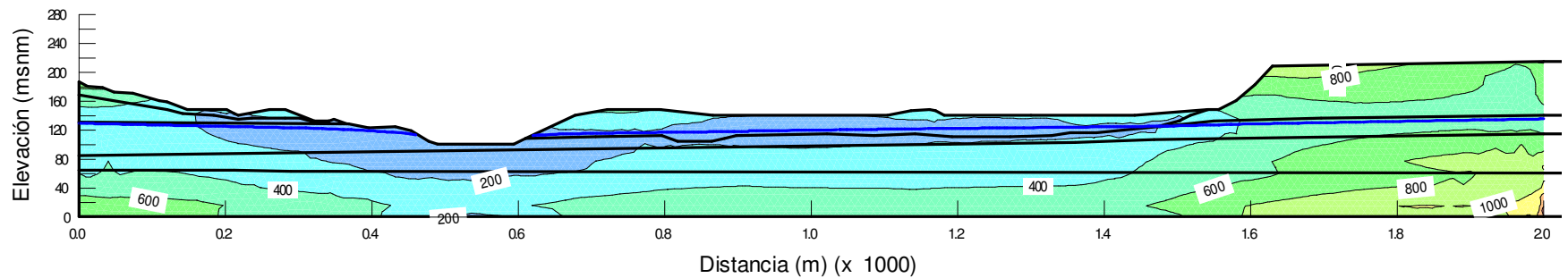
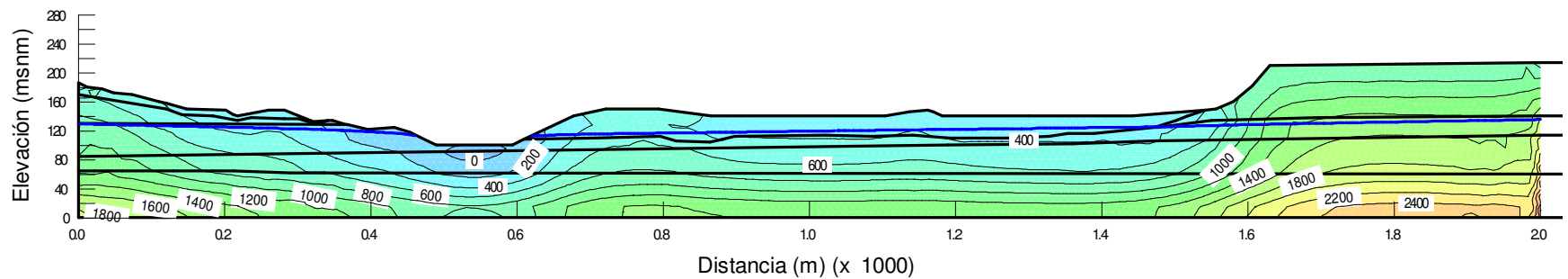


Figura 6-77. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-78. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

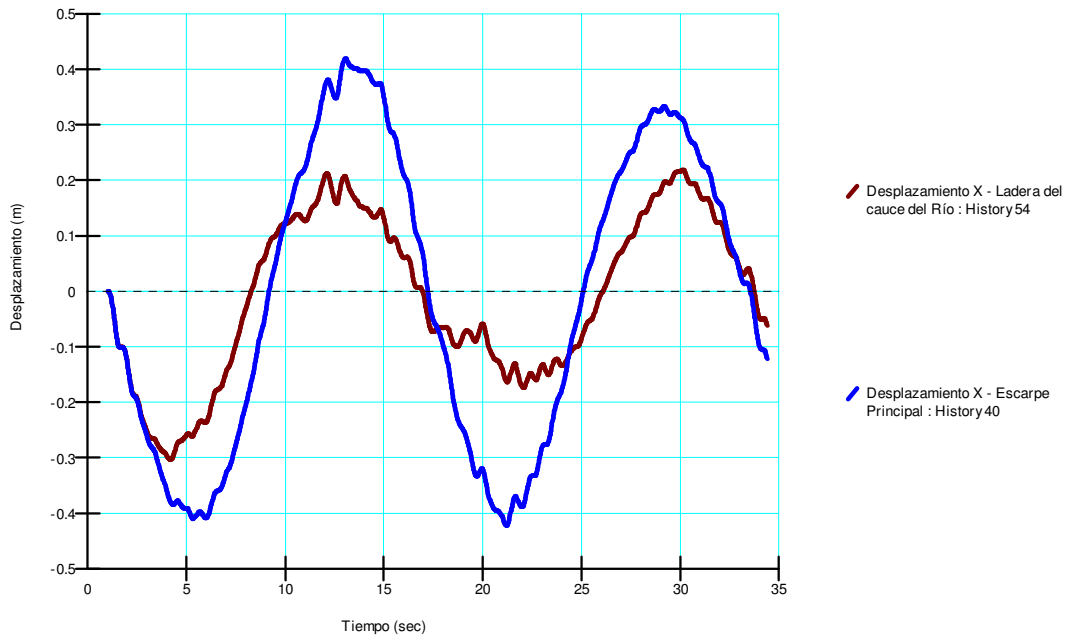
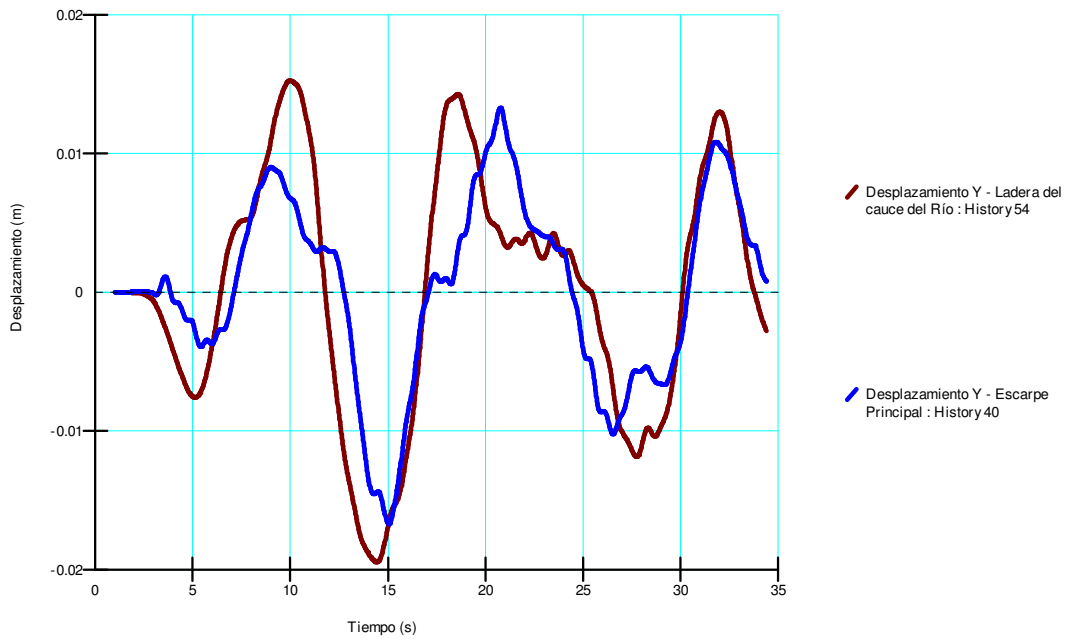


Figura 6-79. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-80. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

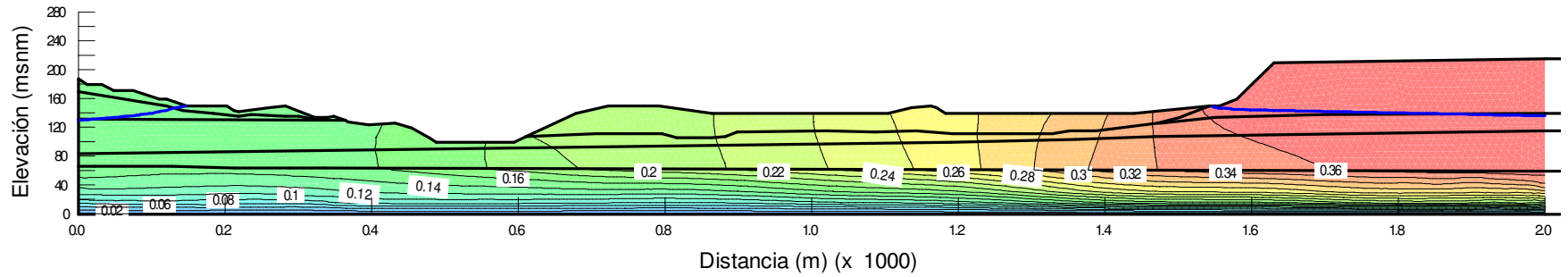
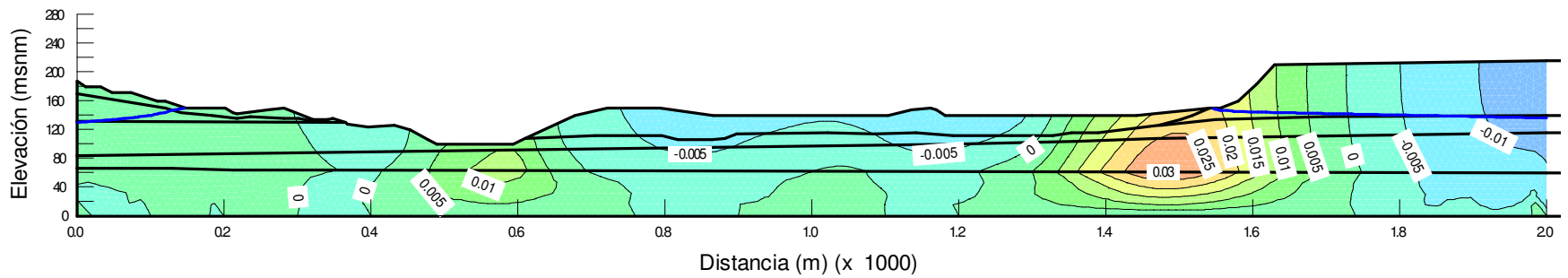


Figura 6-81. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-82. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

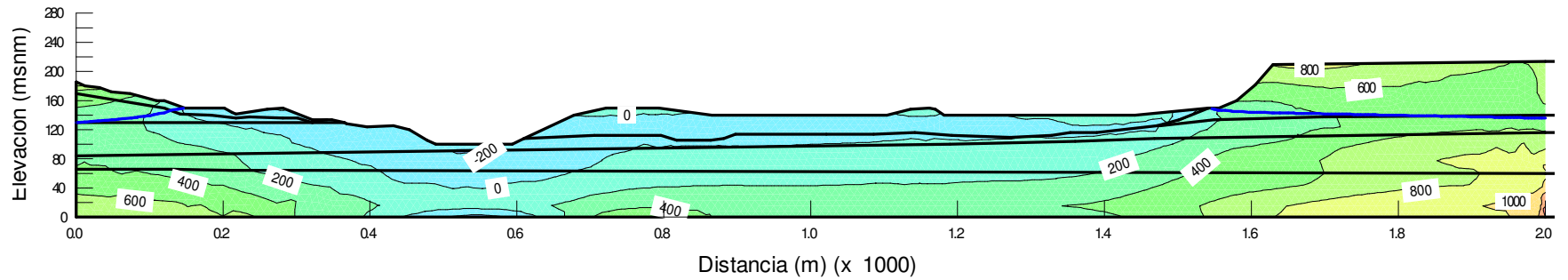
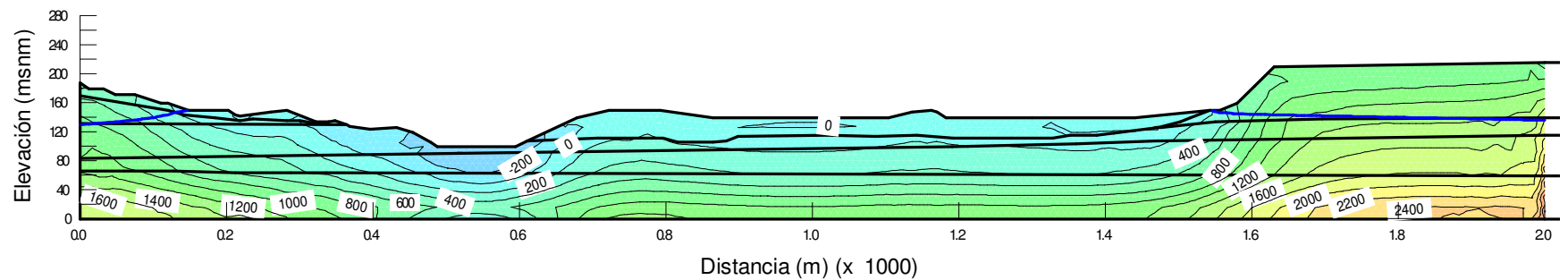


Figura 6-83. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Respuesta dinámica Señal Sismo Valparaíso – Escala menor

De los resultados presentados anteriormente, se describen las siguientes observaciones:

- El comportamiento de los esfuerzos efectivos tanto horizontales como verticales es muy similar a los anteriores análisis. Mostrando valores menores hacia el cauce y mayores en cercanías al escarpe principal.
- En el primer incremento se observan esfuerzos efectivos horizontales del orden de 200 a 600 kPa en la zona del cauce y de 800 a 1000 kPa sobre el escarpe principal. Al aumentar el nivel de agua se observan que los esfuerzos efectivos horizontales en el cauce son nulos para el segundo incremento y alcanzando hasta valores negativos (-200 kPa) para el tercer incremento.
- Para los esfuerzos efectivos verticales durante el primer y segundo incremento se mantienen los mismos valores al interior de la ladera. Pero para el tercer incremento del nivel de agua del río San Pedro los esfuerzos verticales se disminuyen considerablemente, obteniendo valores negativos (-200 kPa) en la base del cauce y en cercanías al escarpe principal, pasando de valores de 400 kPa para el primer y segundo incremento a valores entre 0 kPa y 200 kPa para el tercer incremento.
- De igual forma, la variación de los esfuerzos efectivos tanto horizontales como verticales durante la excitación sísmica, en comparación con el análisis estático inicial, no fue considerable y mantiene el mismo comportamiento en función a su distribución dentro del cuerpo de la ladera.
- En cuanto los desplazamientos horizontales, los mayores movimientos se registran hacia el escarpe principal, reduciéndose uniformemente hacia aguas abajo de la ladera del Taco 3 con un valor máximo de 35 cm sobre el escarpe principal.
- Los desplazamientos verticales, presentan el mismo comportamiento descrito en las anteriores dos señales, con un valor máximo de 2 cm.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-84. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Primer incremento del nivel del río San Pedro

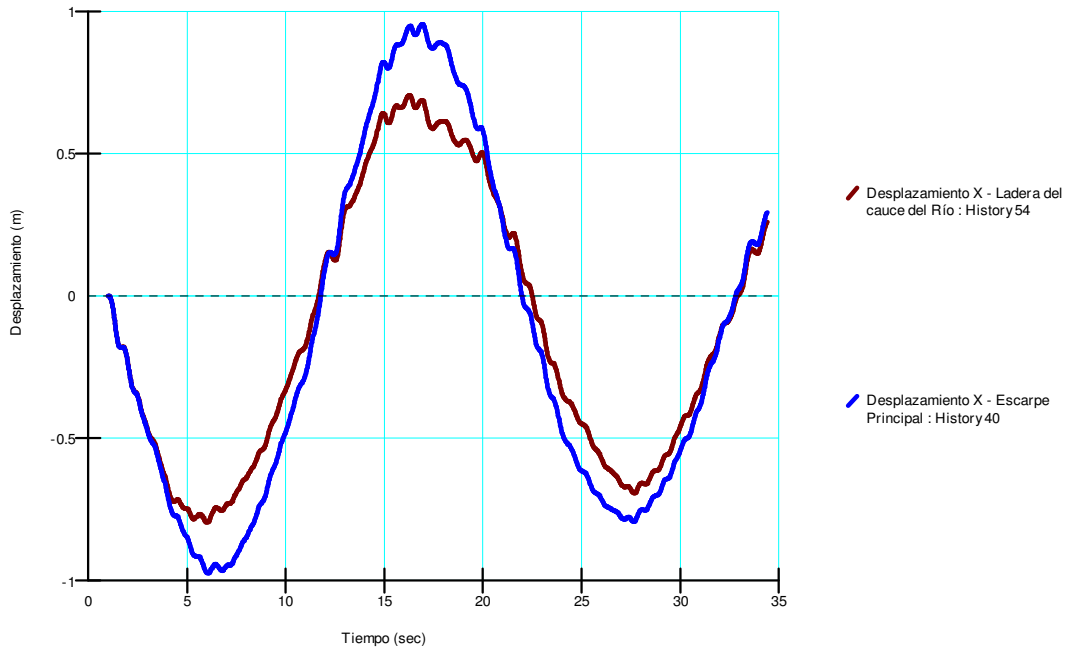
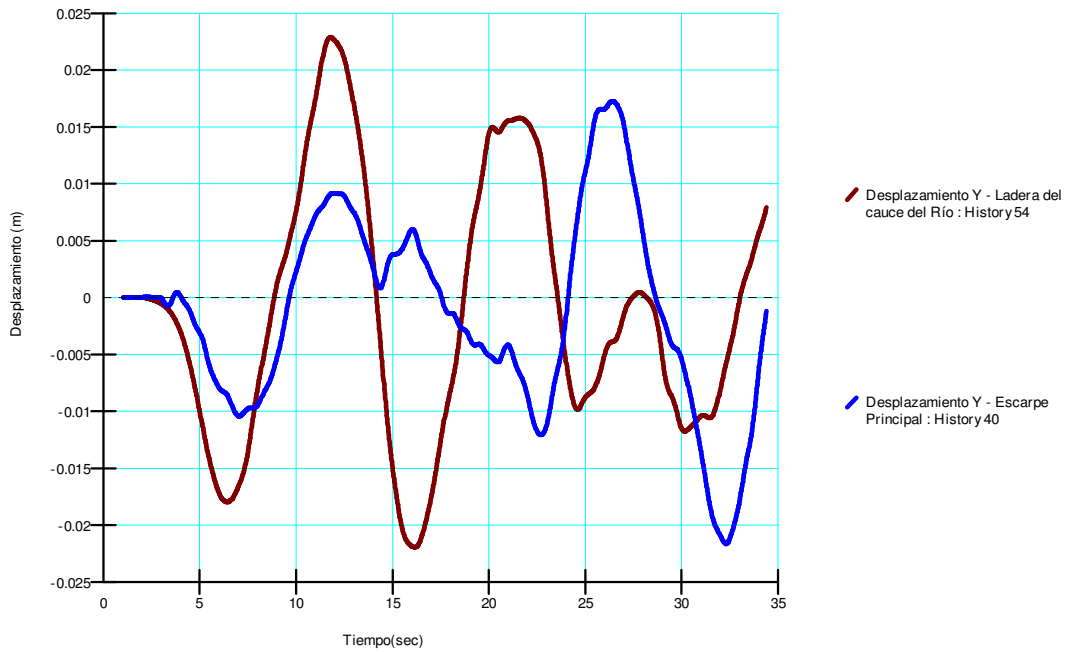


Figura 6-85. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-86. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Primer incremento del nivel del río San Pedro

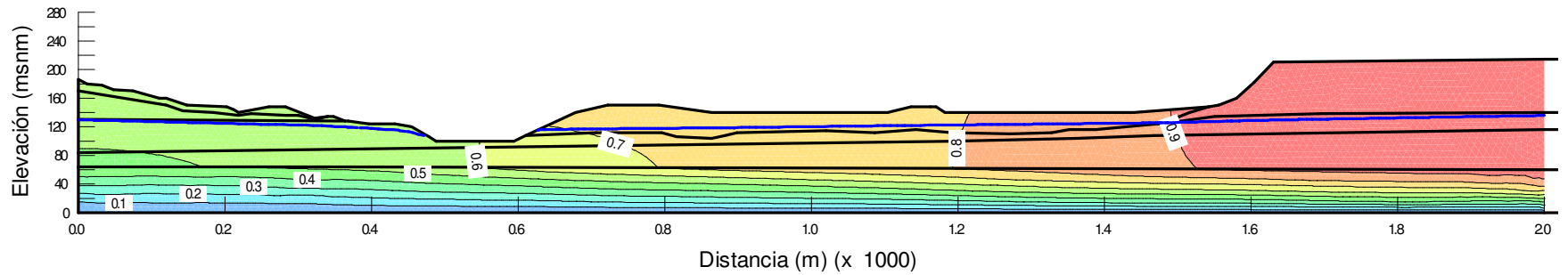
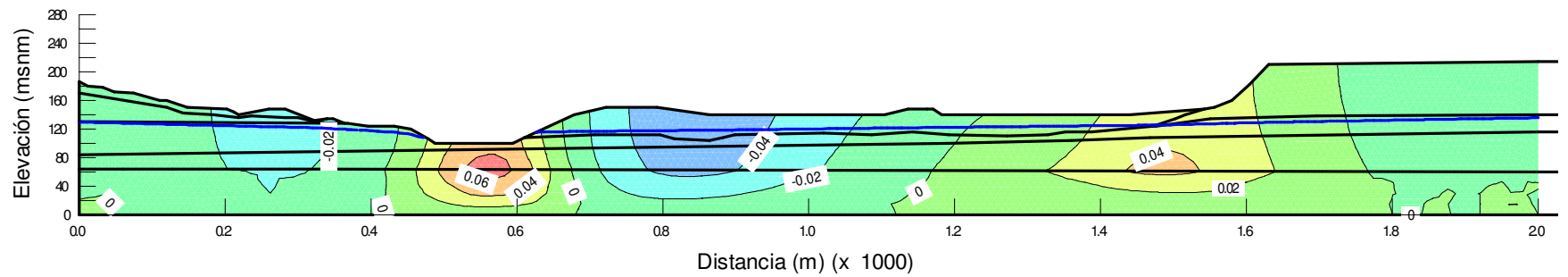


Figura 6-87. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-88. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Primer incremento del nivel del río San Pedro

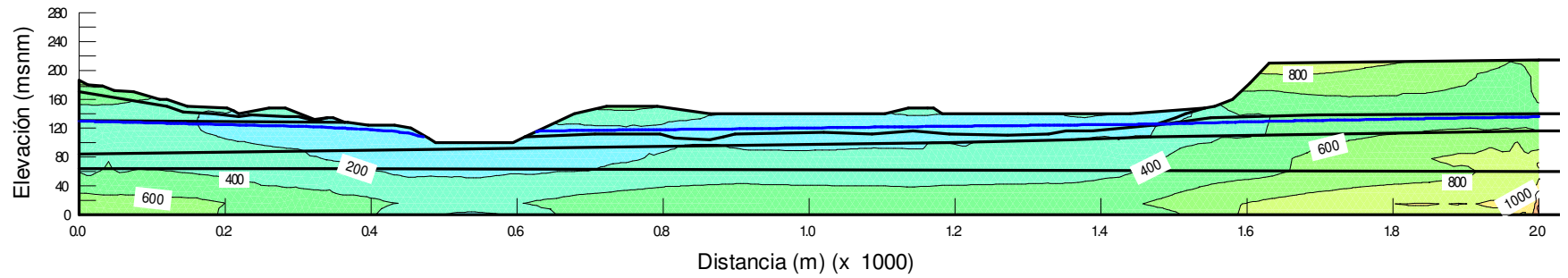
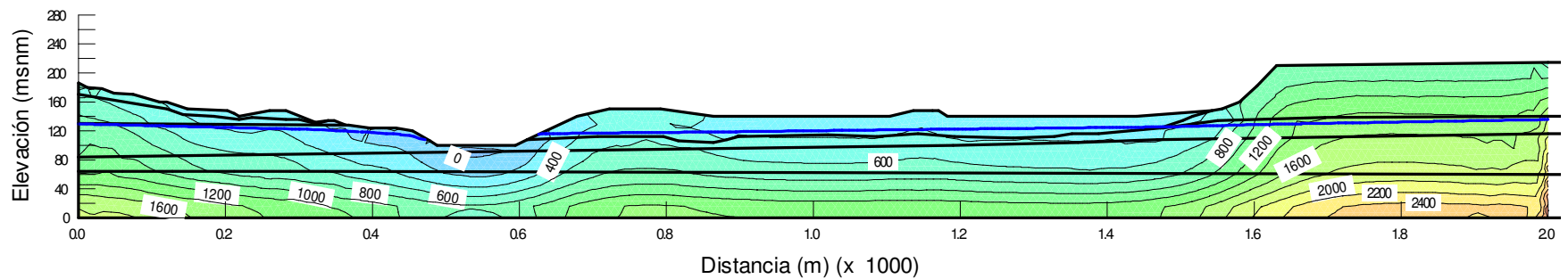


Figura 6-89. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-90. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Segundo incremento del nivel del río San Pedro

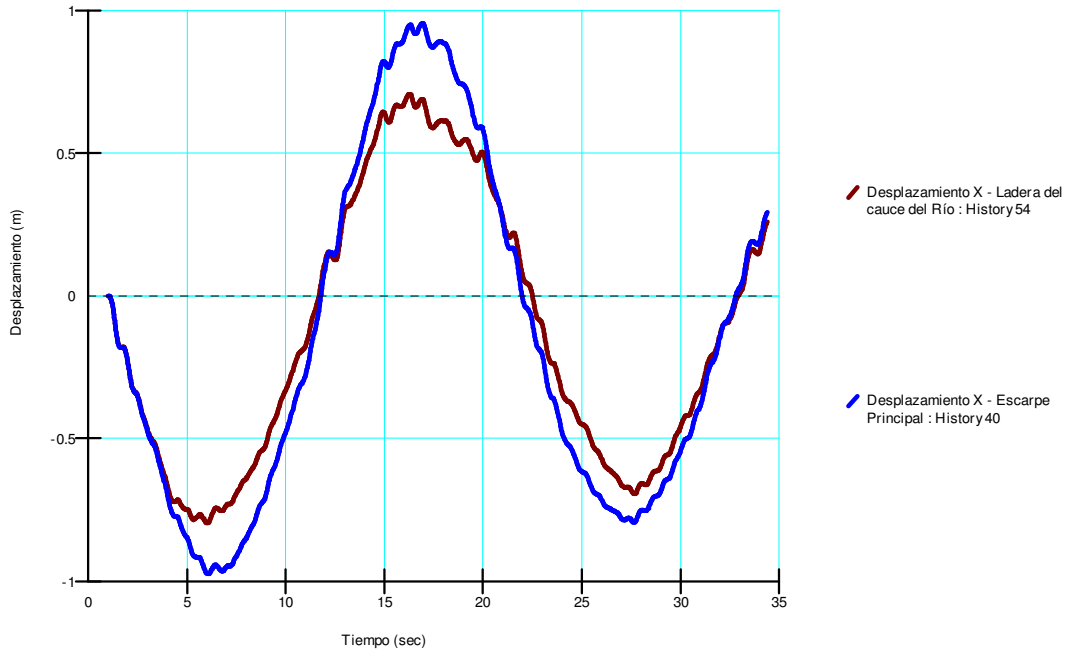
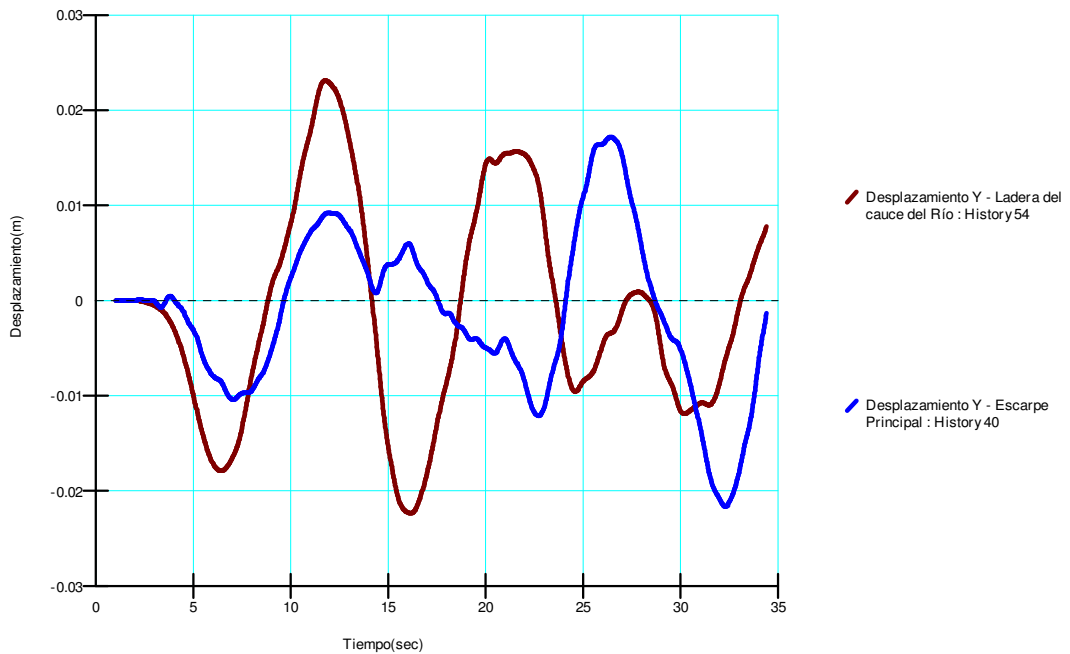


Figura 6-91. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-92. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro

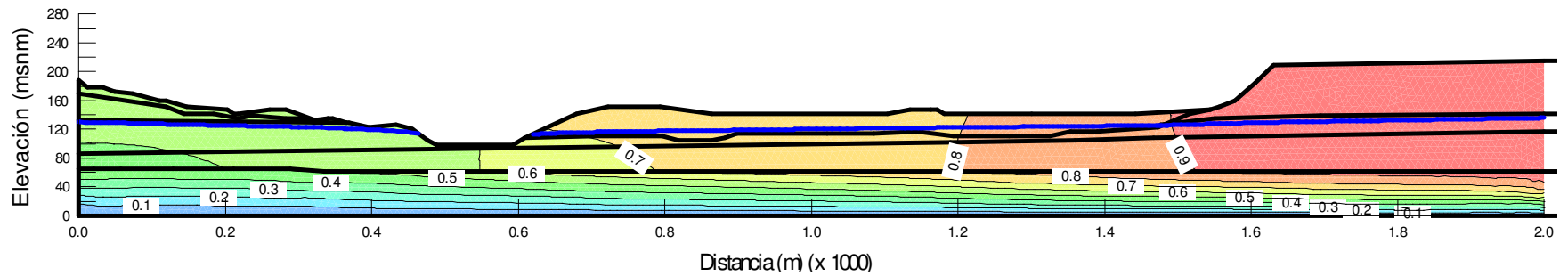
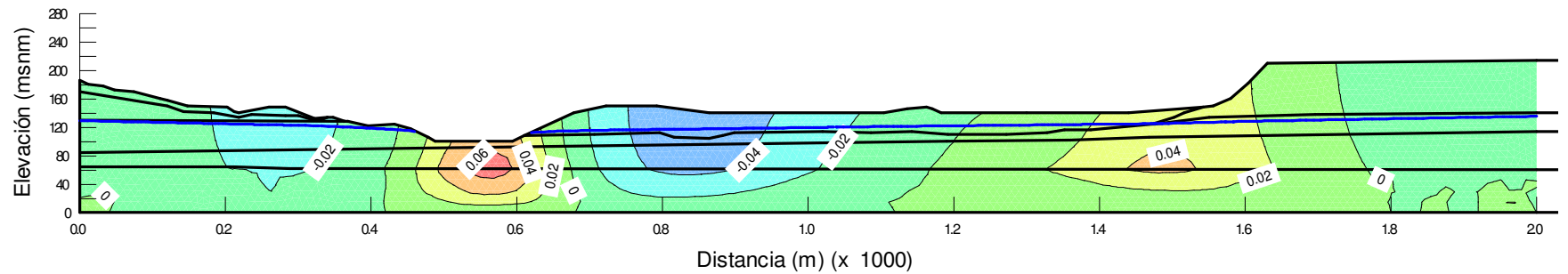


Figura 6-93. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala menor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-94. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro

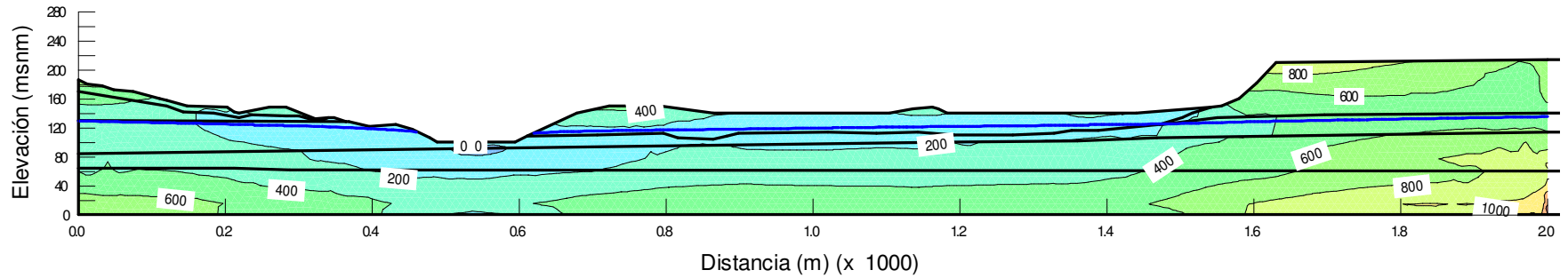
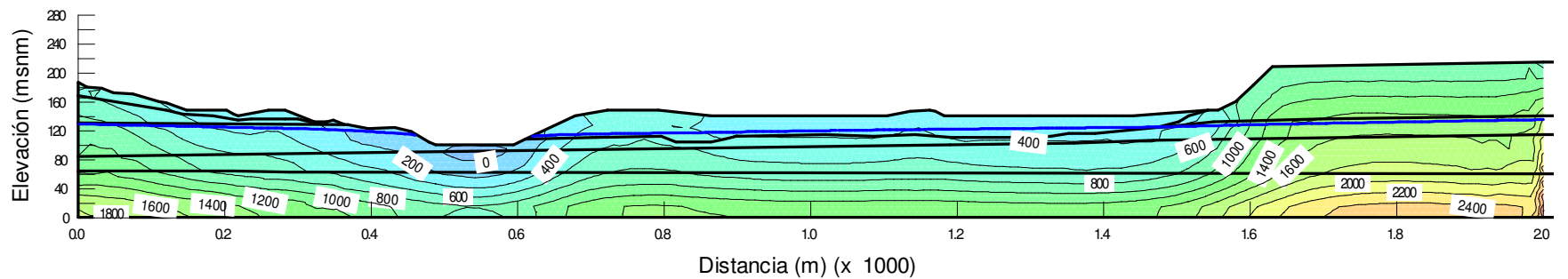


Figura 6-95. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-96. Desplazamiento sísmicamente inducido horizontal (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Tercer incremento del nivel del río San Pedro

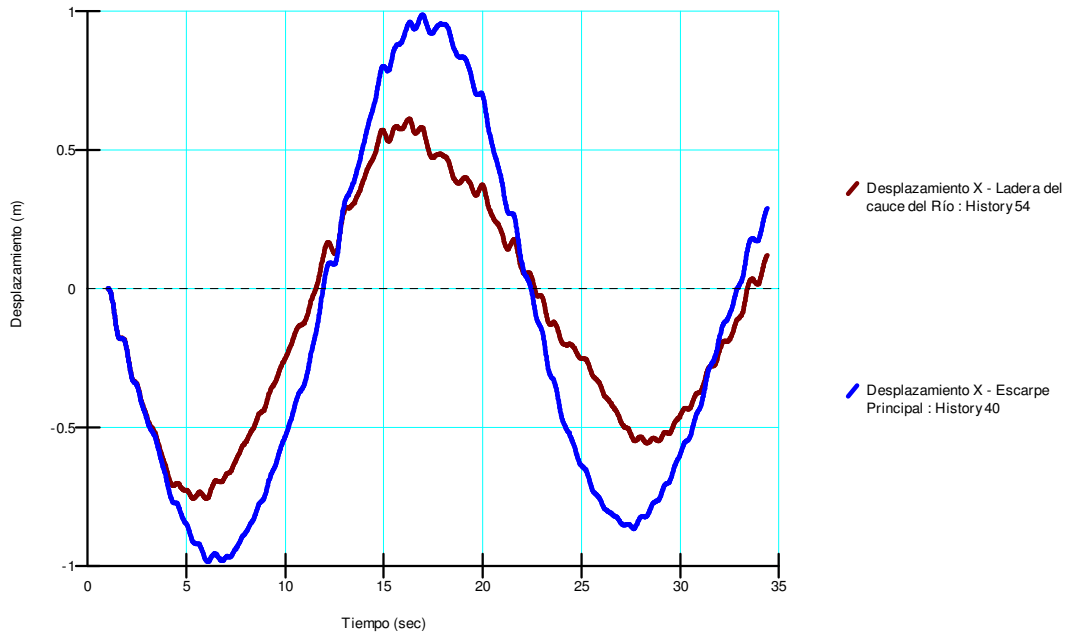
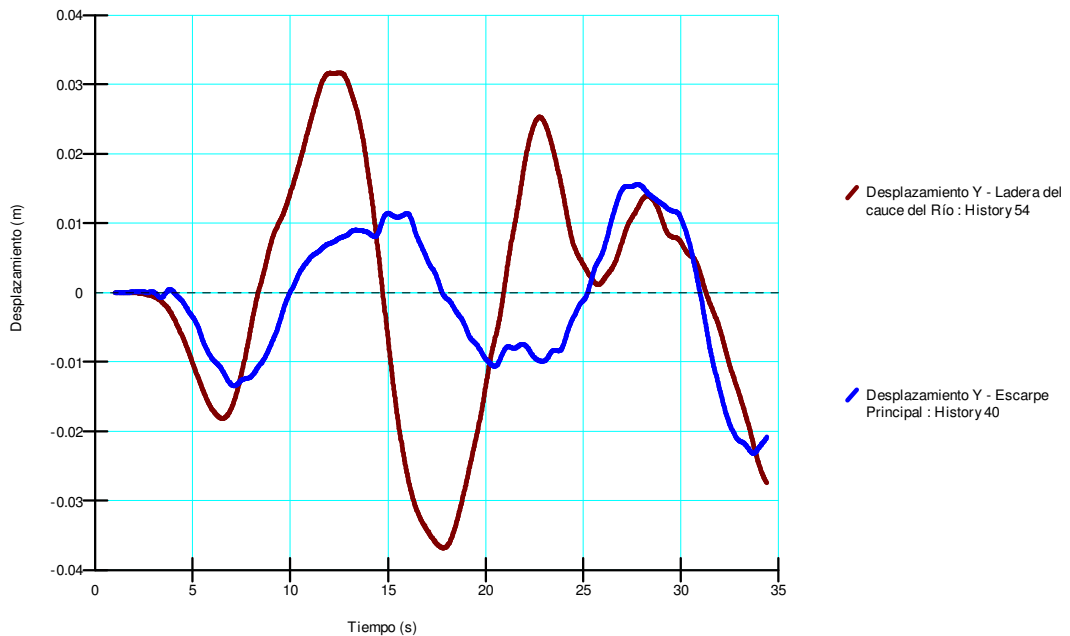


Figura 6-97. Desplazamiento sísmicamente inducido vertical (m) - Sismo Valparaíso escala mayor. Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-98. Desplazamientos horizontales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

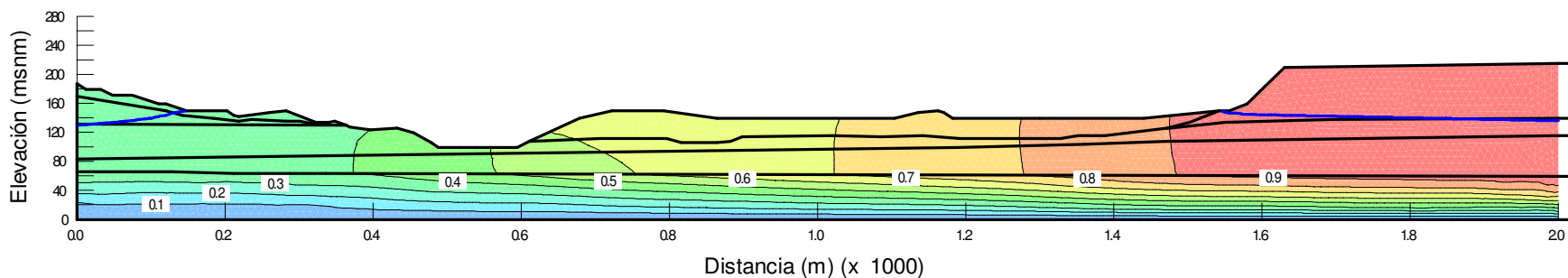


Figura 6-99. Desplazamientos verticales (m) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

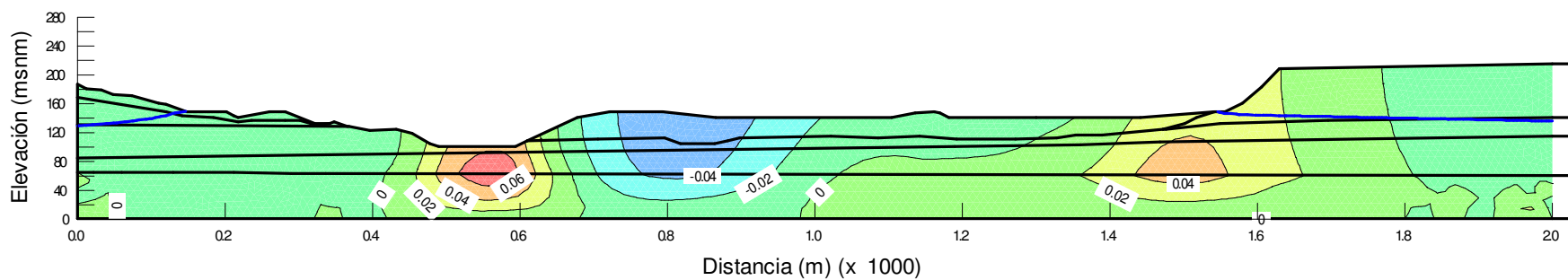


Figura 6-100. Esfuerzos efectivos horizontales σ'_x (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro

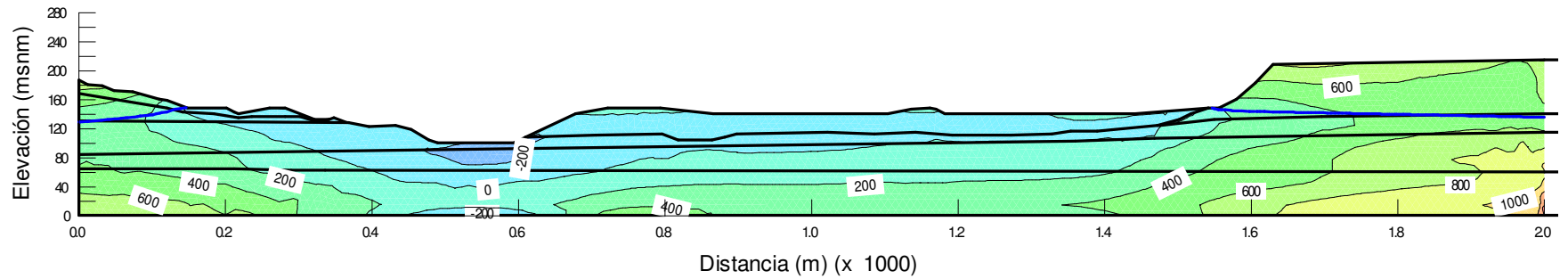
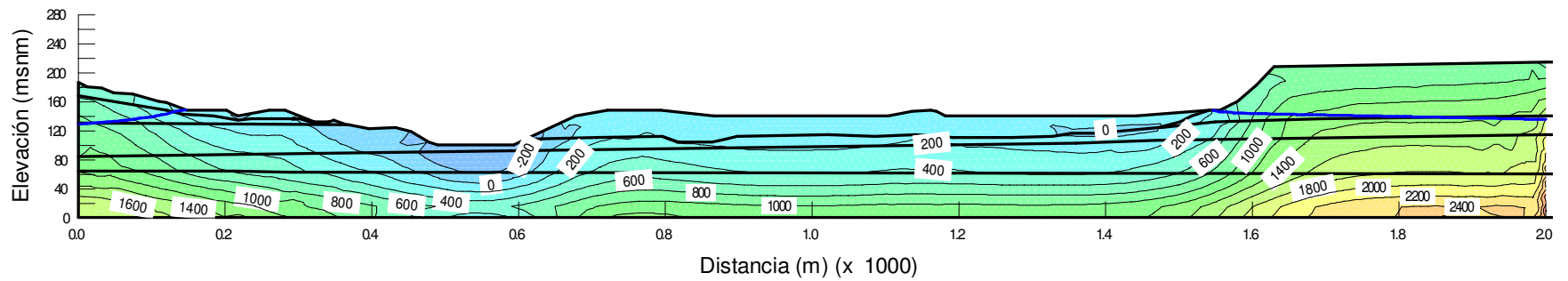


Figura 6-101. Esfuerzos efectivos verticales σ'_y (kPa) en el Taco 3 - Sismo Valparaíso escala mayor - Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

De los anteriores resultados, se observaron las siguientes variaciones:

Respuesta dinámica Señal Sismo Valparaíso – Escala mayor

- De igual forma, la variación de los esfuerzos efectivos durante la excitación sísmica, en comparación con el análisis estático inicial, no fue considerable y mantiene el mismo comportamiento en función del nivel del agua detallado en los anteriores análisis.
- En el primer incremento se observan esfuerzos efectivos horizontales del orden de 200 a 600 kPa en la zona del cauce y de 800 a 1000 kPa sobre el escarpe principal. Al aumentar el nivel de agua se observan que los esfuerzos efectivos horizontales en el cauce son nulos para el segundo incremento y alcanzando hasta valores negativos (-200 kPa) para el tercer incremento.
- Para los esfuerzos efectivos verticales durante el primer y segundo incremento se mantienen los mismos valores al interior de la ladera. Pero para el tercer incremento del nivel de agua del río San Pedro los esfuerzos verticales se disminuyen considerablemente, obteniendo valores negativos (-200 kPa) en la base del cauce y en cercanías al escarpe principal, pasando de valores de 400 kPa para el primer y segundo incremento a valores entre 0 kPa y 200 kPa para el tercer incremento.
- Como era de esperarse, este sismo genera los mayores desplazamientos horizontales en la ladera, dada la magnitud de la señal. El valor máximo se registra sobre el escarpe principal con un valor de 90 cm disminuyendo gradualmente en dirección hacia aguas abajo.
- En cuanto a los desplazamientos verticales el valor máximo fue de 6 cm y su comportamiento en relación al régimen de flujo es el mismo que se ha analizado anteriormente.

En términos generales se observa que la mayor variación en los esfuerzos efectivos se debe al cambio en el régimen de flujo, lo cual se ve claramente en la disminución de los esfuerzos a partir del tercer incremento. Esta disminución en los esfuerzos efectivos se debe a la saturación del suelo por el aumento en el nivel del agua, pues al actuar las cargas sísmicas en el material saturado, se genera un incremento en la presión de poros y, por ende, la reducción en los esfuerzos efectivos.

El anterior comportamiento describe el fenómeno de licuación, que, debido al aumento en el nivel del agua y como efecto del repentino incremento en la presión de poros generados por el sismo, representa una pérdida de resistencia al corte

del suelo y conduce a que él se deforme excesivamente luego de las repetitivas perturbaciones del evento dinámico.

Por tanto, se evidencia en los resultados de desplazamientos horizontales obtenidos los valores entre 20 a 90 cm, siendo el mayor valor para el caso del sismo de Valparaíso de escala mayor debido a que es la señal de mayor amplitud.

6.6.4 Análisis de estabilidad dinámico de la ladera del Taco 3

Para realizar este análisis de estabilidad, se empleó el software SLOPE/W[®], importando los resultados del estado de esfuerzos obtenido del análisis dinámico de QUAKE/W[®], el cual utiliza internamente la formulación de equilibrio límite para calcular cada uno de los factores de seguridad bajo la acción de un movimiento telúrico (sismo de diseño).

Los mecanismos de falla analizados fueron los mismos que se establecieron en el análisis de estabilidad estática, localizado cerca al cauce del Río San Pedro y al escarpe principal. Para evaluar el cambio en la estabilidad en cada uno de los cuatro sismos establecidos, se tomó como referencia el último paso de tiempo y el tiempo en el cual ocurrió la aceleración pico. El análisis se realizó también en cada nivel de embalse definido en el análisis de flujo.

El resumen de los resultados del análisis de estabilidad estático y dinámico para el mecanismo de falla cerca al cauce del Río San Pedro y al escarpe principal del Taco 3, se presenta en el Cuadro 6-3 y Cuadro 6-4, respectivamente.

Los resultados de los análisis de estabilidad dinámicos para cada señal sísmica, obtenidos por medio de la simulación numérica con elementos finitos. Se presentan de la Figura 6-102 a la Figura 6-149.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Cuadro 6-3. Resumen de los factores de seguridad obtenidos del análisis dinámico para el mecanismo de falla cauce del Río San Pedro.

Señal	Evento	Factor de seguridad obtenido		
		Estático	Sismo- t_f	Sismo- t_{ap}
Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40$ s) ($t_{ap} = 21,66$ s)	Primer incremento	2,16	2,13	2,02
	Segundo incremento	2,22	2,18	2,06
	Tercer incremento	2,27	0,17	0,15
Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62$ s) ($t_{ap} = 18,22$ s)	Primer incremento	2,16	2,08	2,11
	Segundo incremento	2,22	2,12	2,15
	Tercer incremento	2,27	0,16	0,17
Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40$ s) ($t_{ap} = 21,66$ s)	Primer incremento	2,16	2,03	2,07
	Segundo incremento	2,22	2,07	2,05
	Tercer incremento	2,27	0,16	0,15
Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40$ s) ($t_{ap} = 21,66$ s)	Primer incremento	2,16	2,06	2,07
	Segundo incremento	2,22	2,11	2,11
	Tercer incremento	2,27	0,17	0,16

t_f : Tiempo final de la señal del sismo
 t_{ap} : Tiempo en el cual se da la aceleración pico.

Cuadro 6-4. Resumen de los factores de seguridad obtenidos del análisis dinámico para el mecanismo de falla en el escarpe principal del Taco 3.

Señal	Evento	Factor de seguridad obtenido		
		Estático	Sismo- t_f	Sismo- t_{ap}
Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40$ s) ($t_{ap} = 21,66$ s)	Primer incremento	2,78	2,86	2,73
	Segundo incremento	2,78	2,86	2,73
	Tercer incremento	2,41	2,43	2,28
Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62$ s) ($t_{ap} = 18,22$ s)	Primer incremento	2,78	2,73	2,86
	Segundo incremento	2,78	2,74	2,80
	Tercer incremento	2,41	2,35	2,39
Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40$ s) ($t_{ap} = 21,66$ s)	Primer incremento	2,78	2,72	2,78
	Segundo incremento	2,78	2,72	2,71
	Tercer incremento	2,41	2,32	2,28
Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40$ s) ($t_{ap} = 21,66$ s)	Primer incremento	2,78	2,82	2,78
	Segundo incremento	2,78	2,82	2,79
	Tercer incremento	2,41	2,39	2,40

t_f : Tiempo final de la señal del sismo
 t_{ap} : Tiempo en el cual se da la aceleración pico.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-102. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$)- Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro

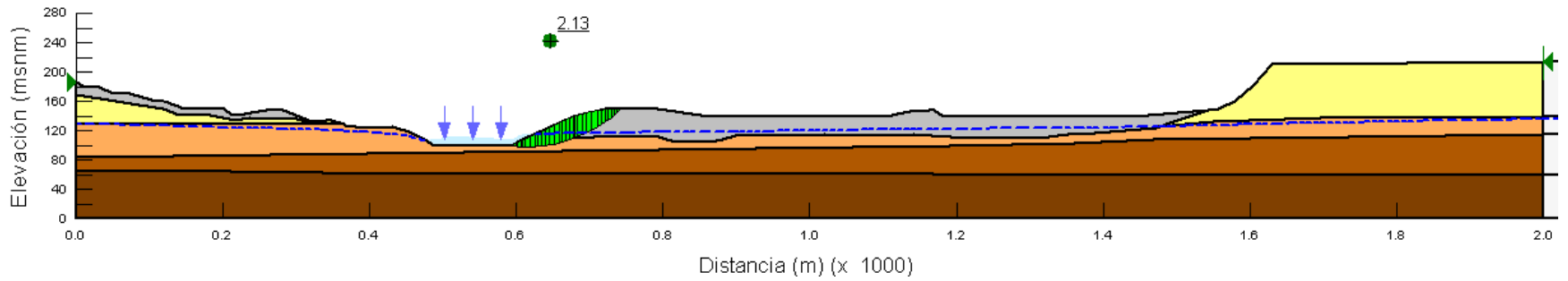
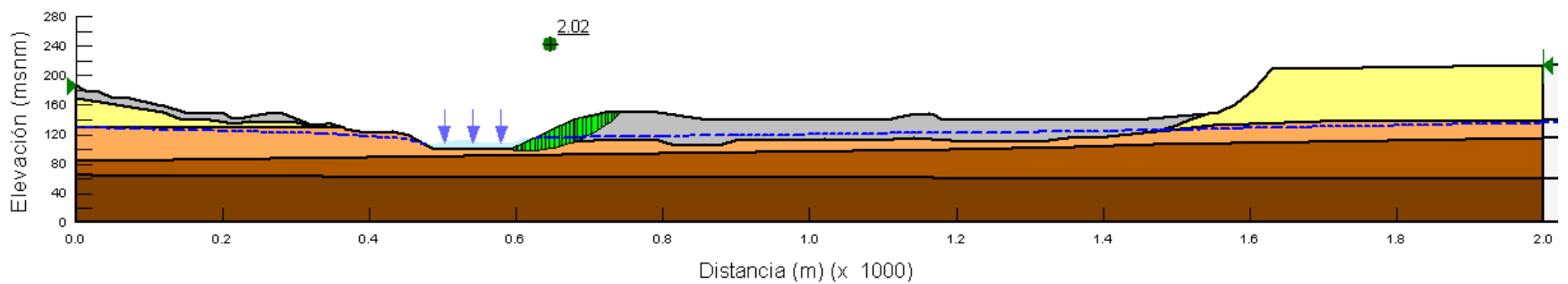


Figura 6-103. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-104. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$)- Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro

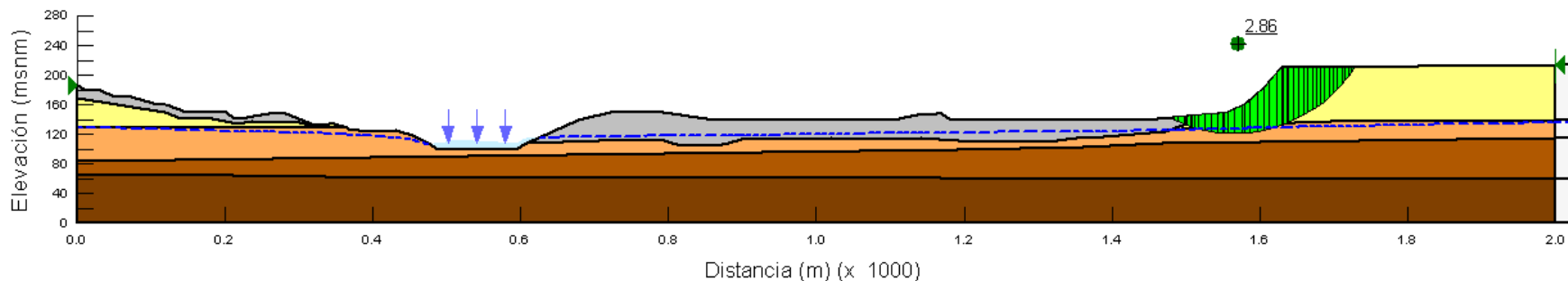
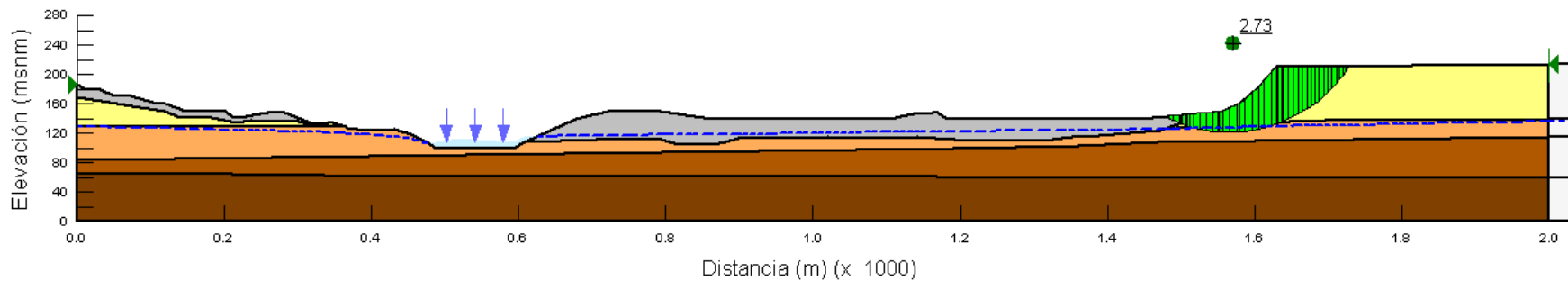


Figura 6-105. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso: ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-106. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_r = 34,40s$)- Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

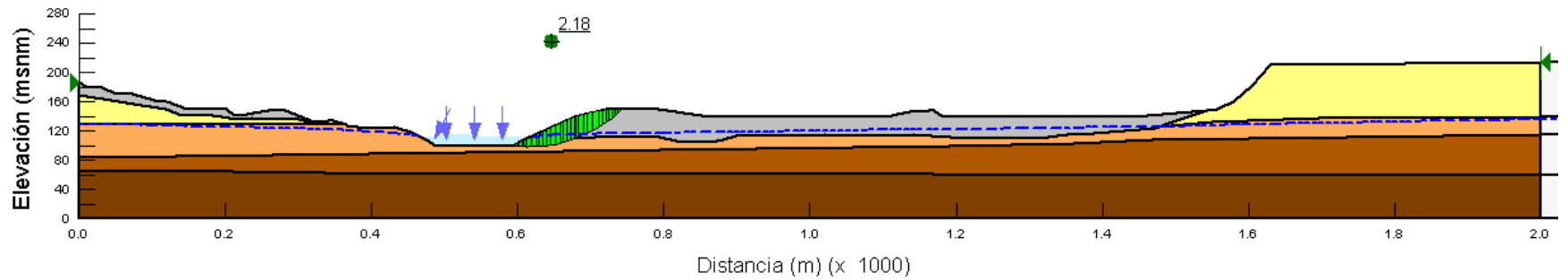
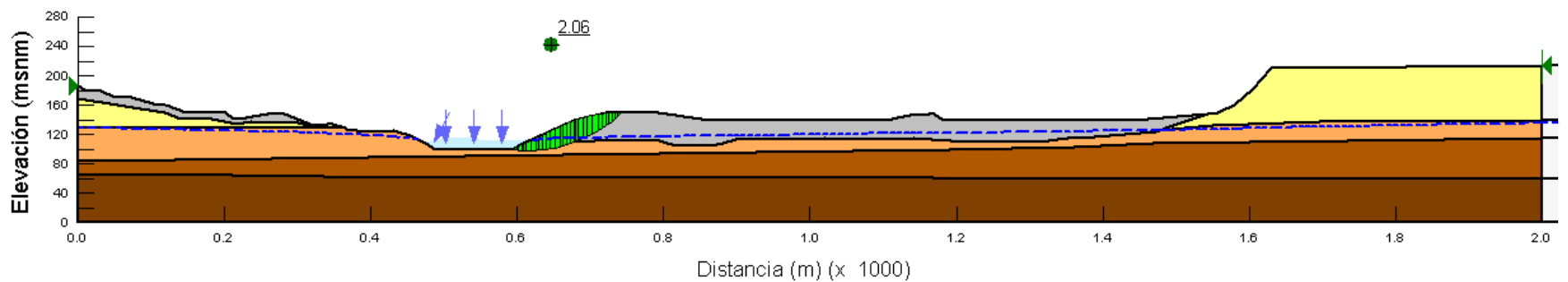


Figura 6-107. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-108. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

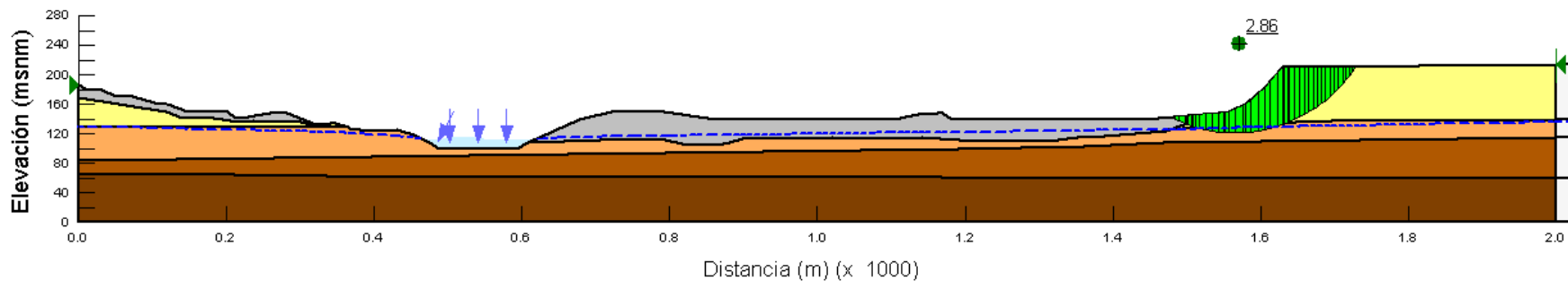
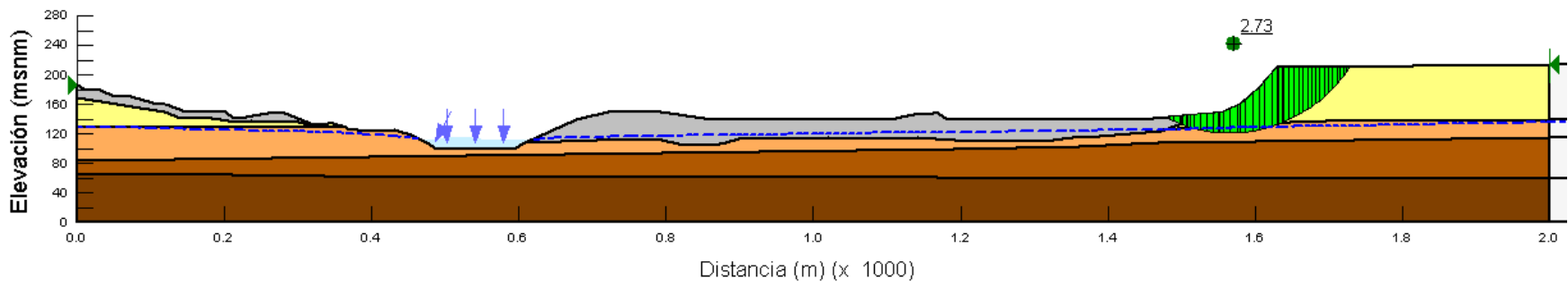


Figura 6-109. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-110. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$)- Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro

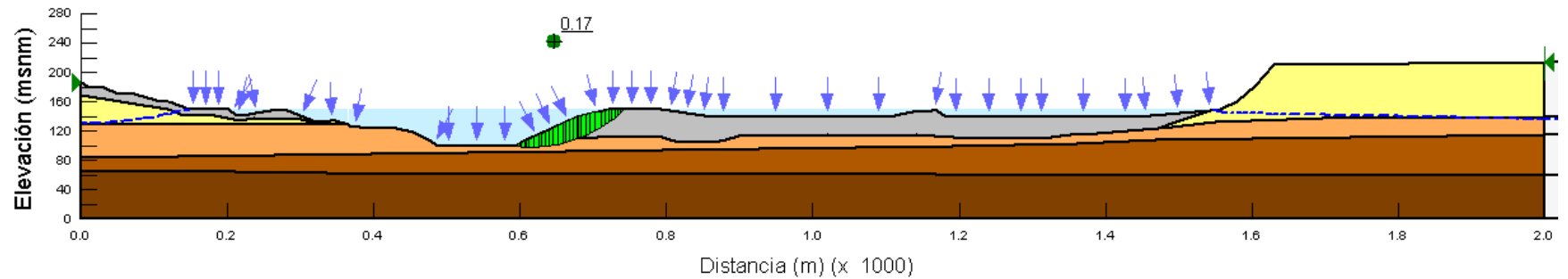
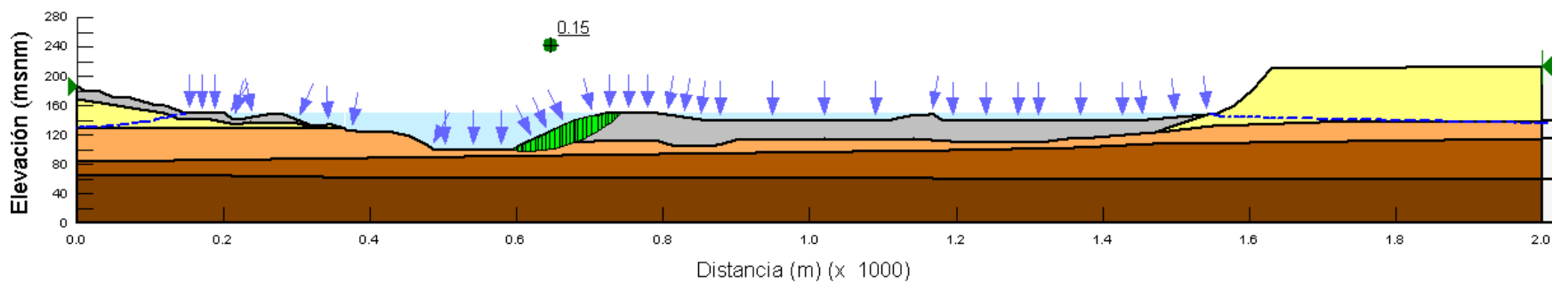


Figura 6-111. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro –Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-112. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_f = 34,40s$) - Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro

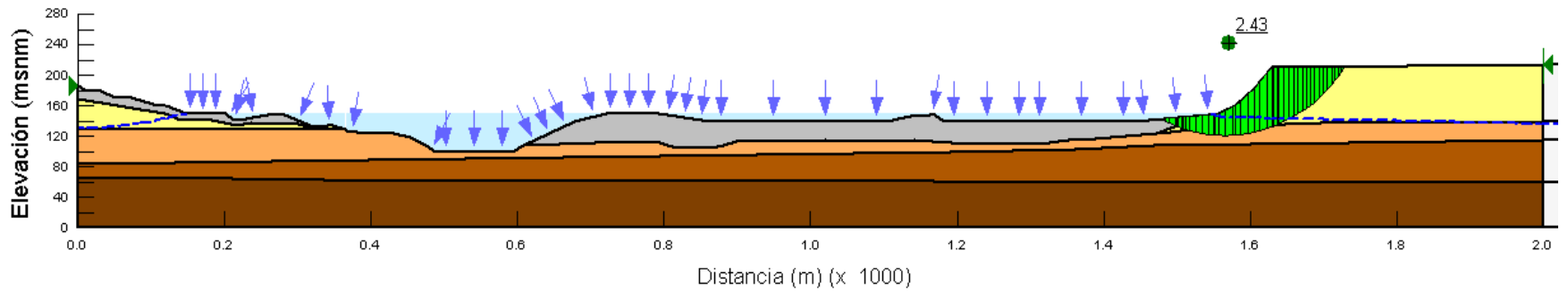
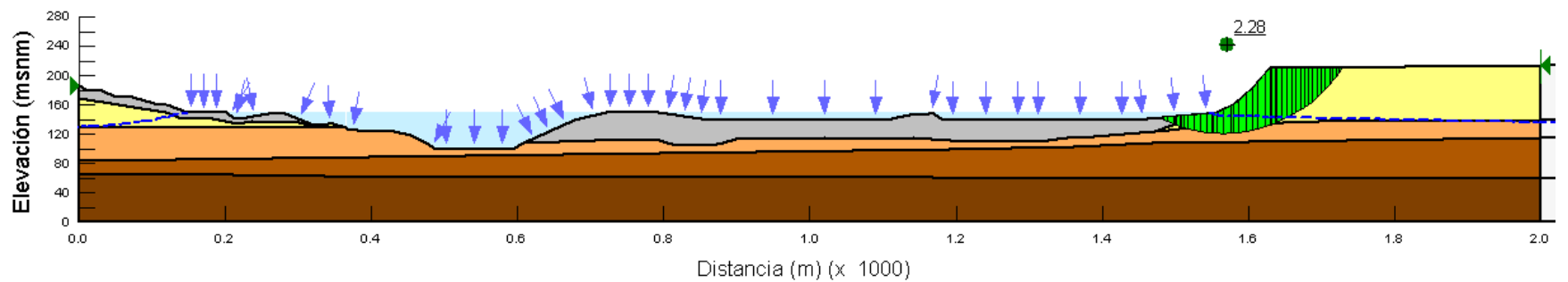


Figura 6-113. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-114. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro

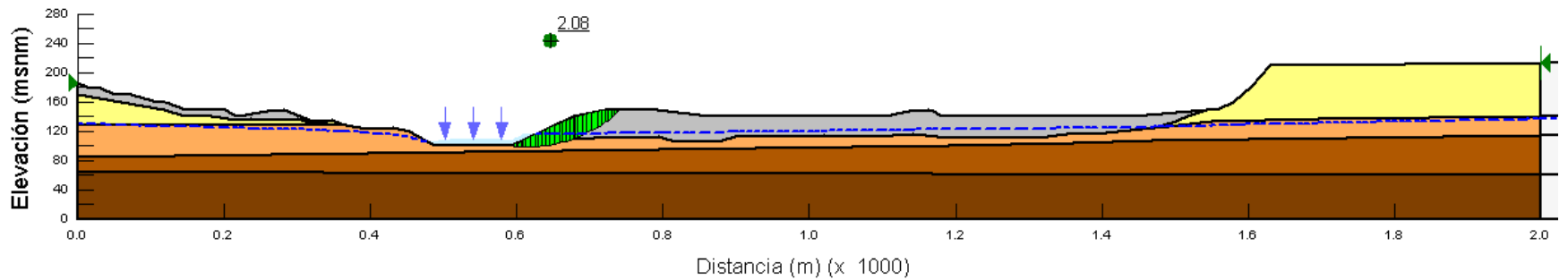
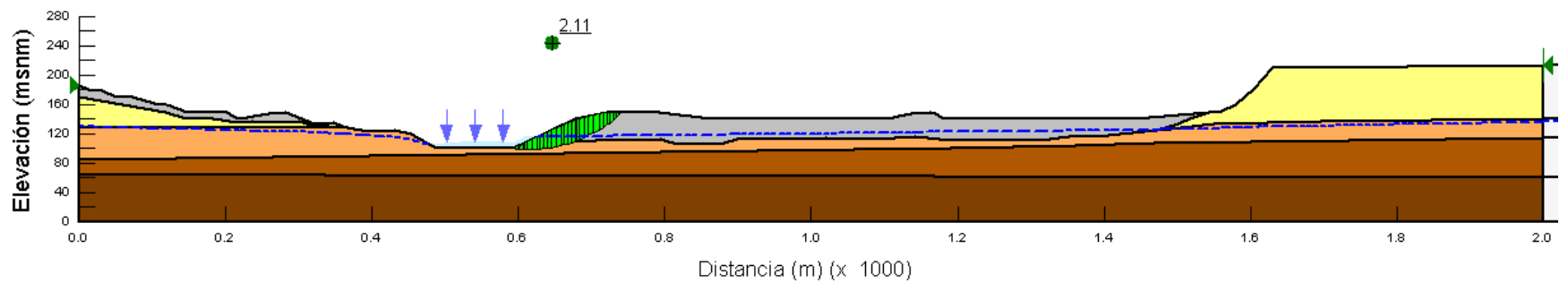


Figura 6-115. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22$) - Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-116. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro

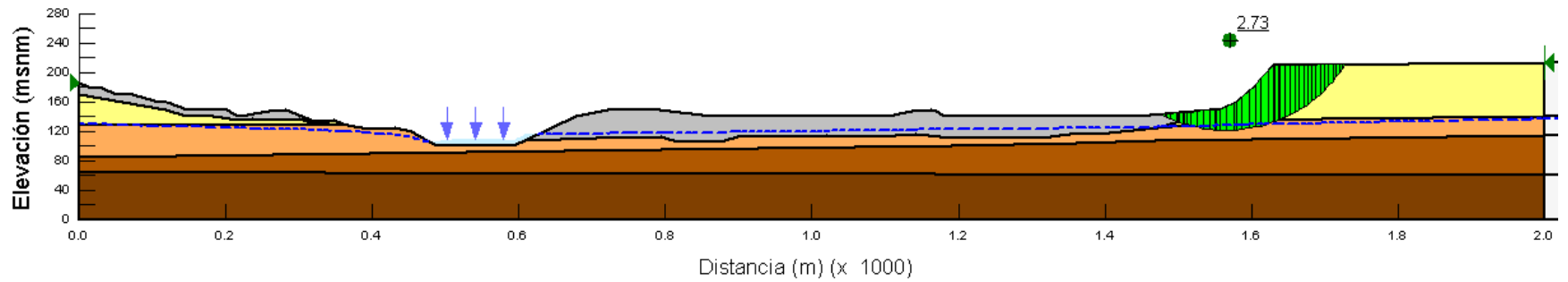
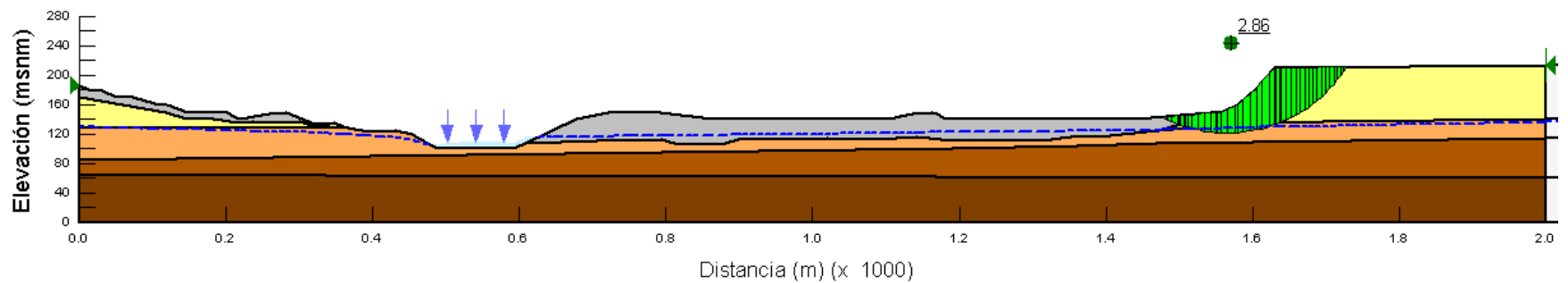


Figura 6-117. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22s$) - Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-118. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

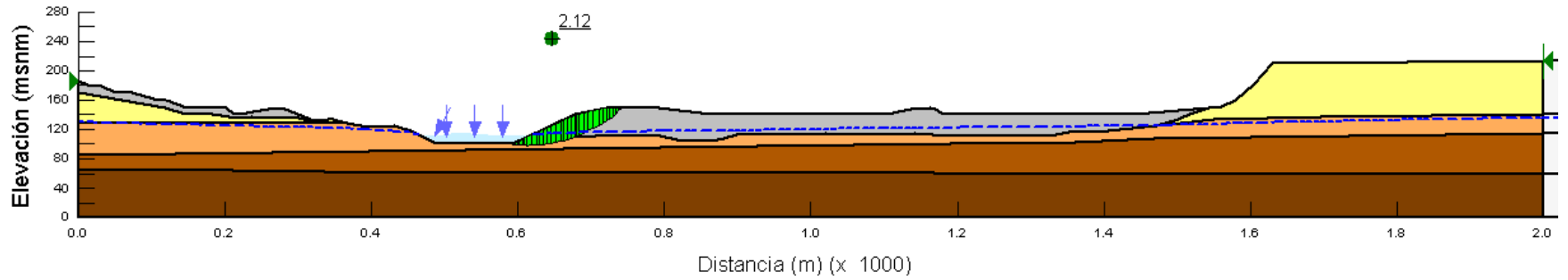
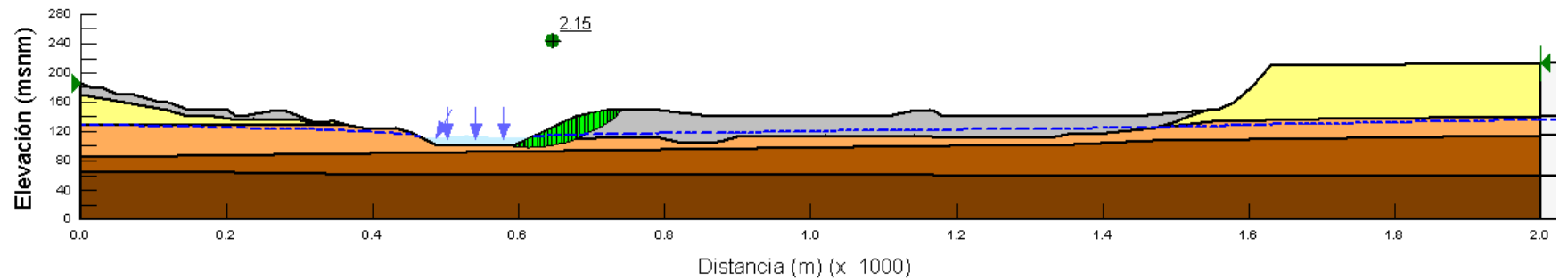


Figura 6-119. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22$) - Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-120. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_r = 30,62s$) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

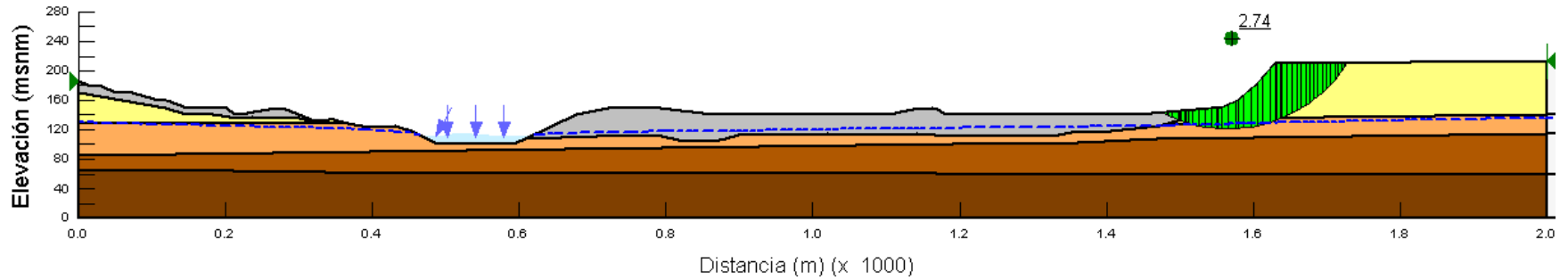
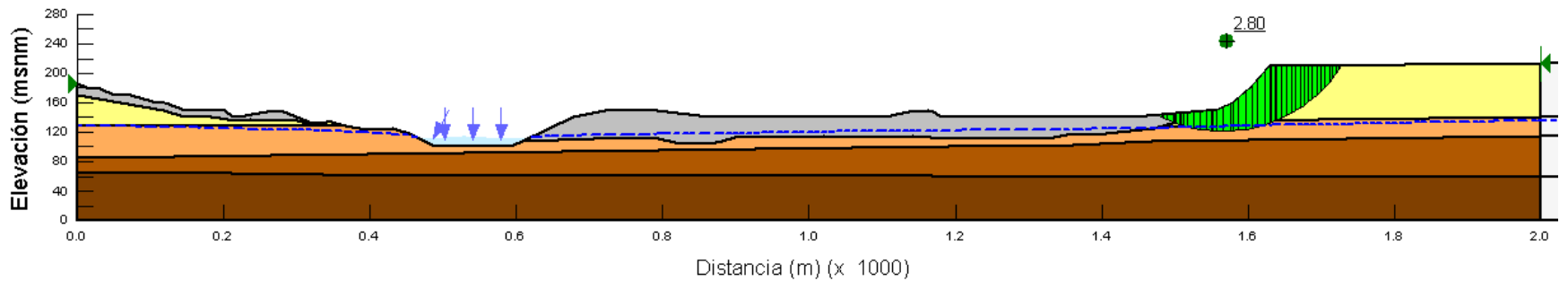


Figura 6-121. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22s$) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-122. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro

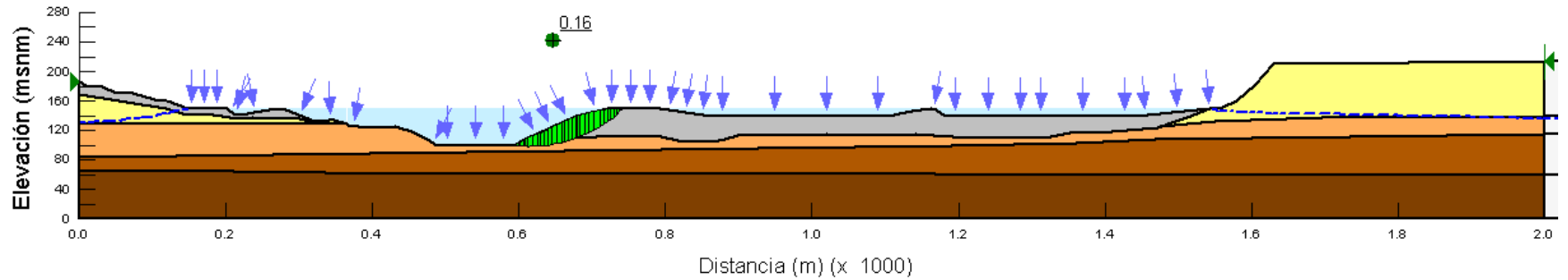
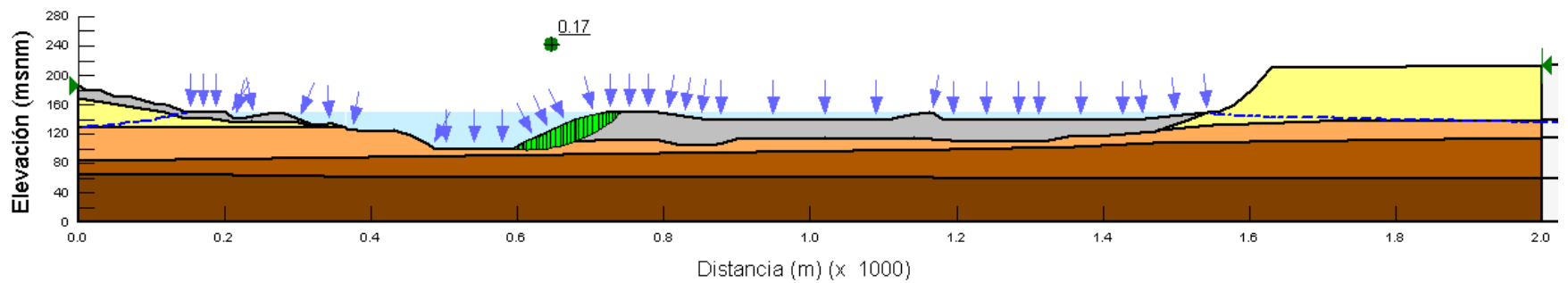


Figura 6-123. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22$) - Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-124. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_f = 30,62s$)- Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro

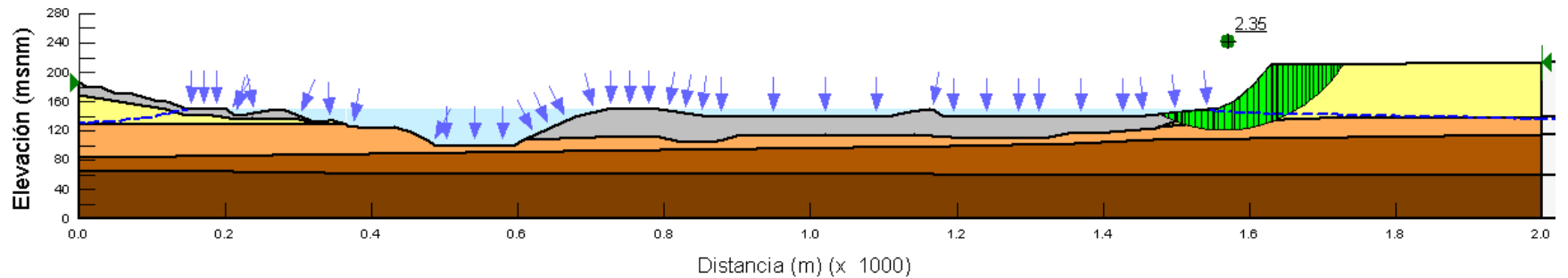
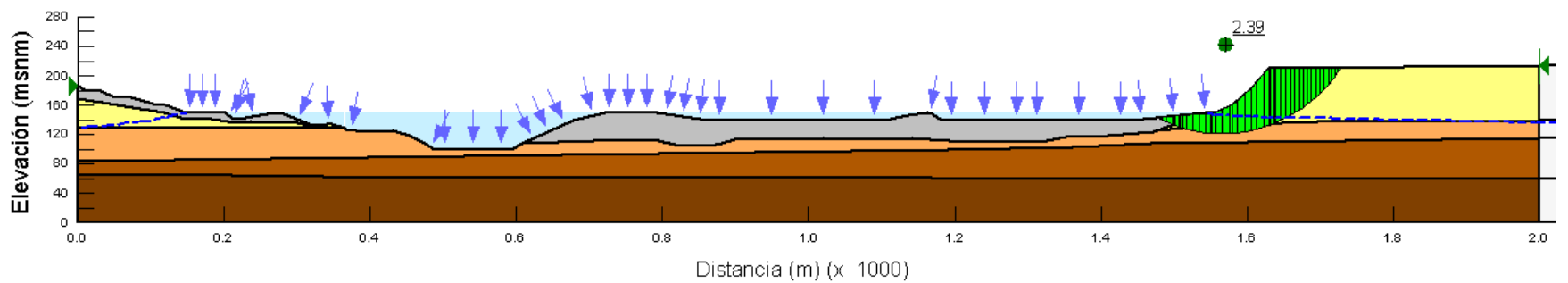


Figura 6-125. Análisis dinámico - Sismo Tarapacá ($t_{ap}=18,22s$) - Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-126. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$) - Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro

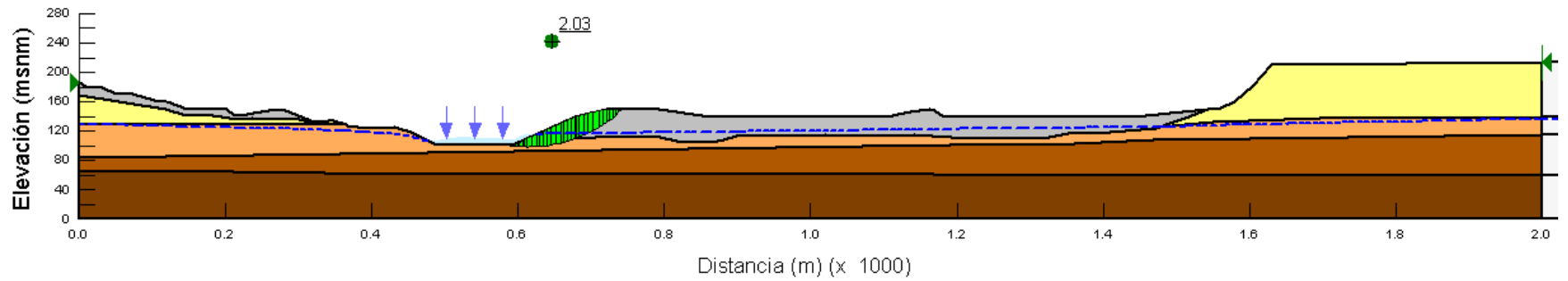
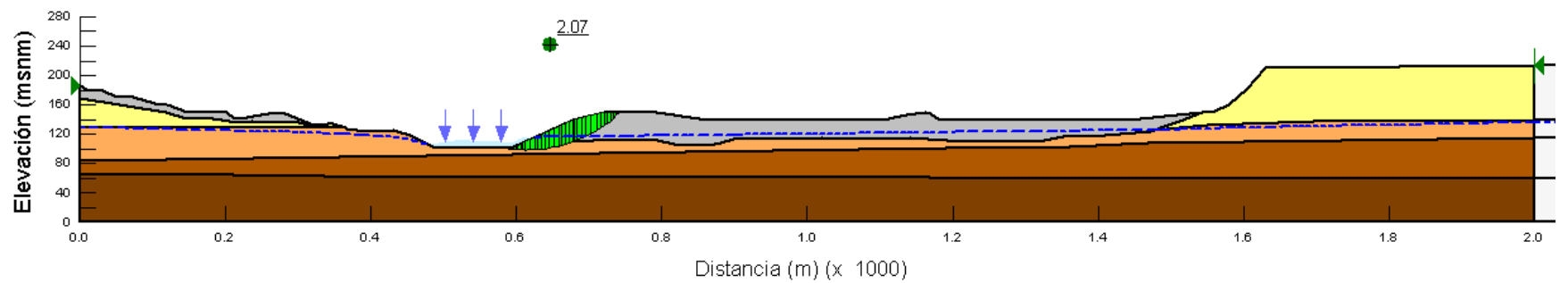


Figura 6-127. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-128. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)- Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro

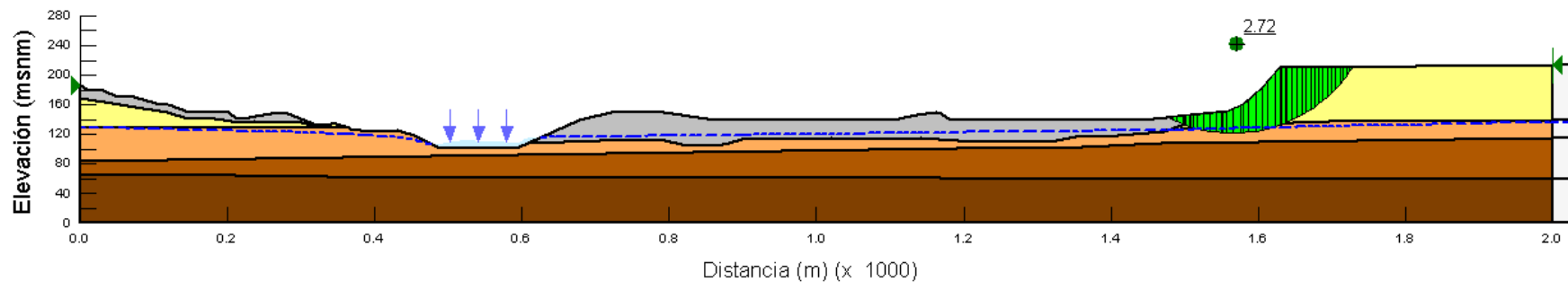
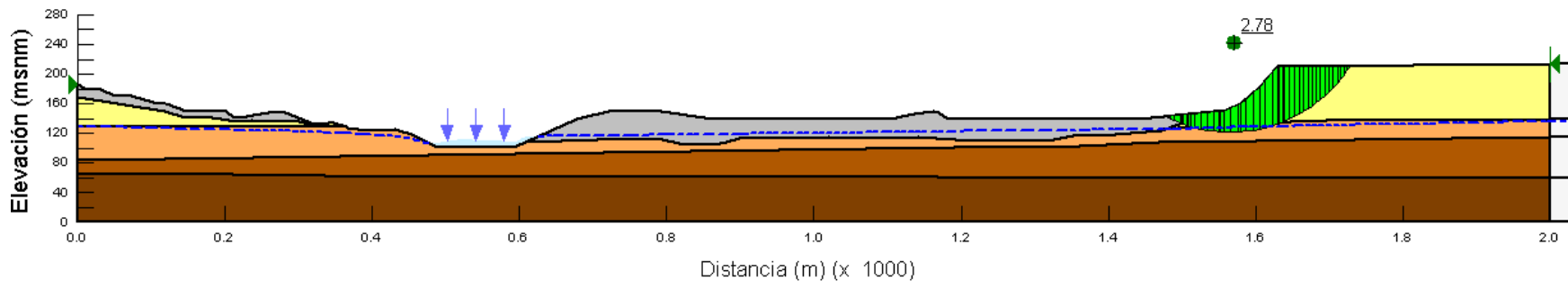


Figura 6-129. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-130. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)- Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

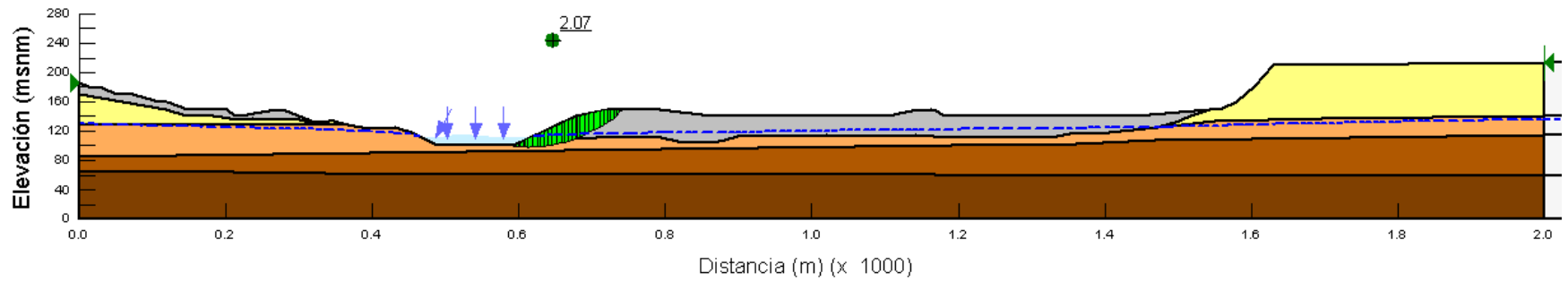
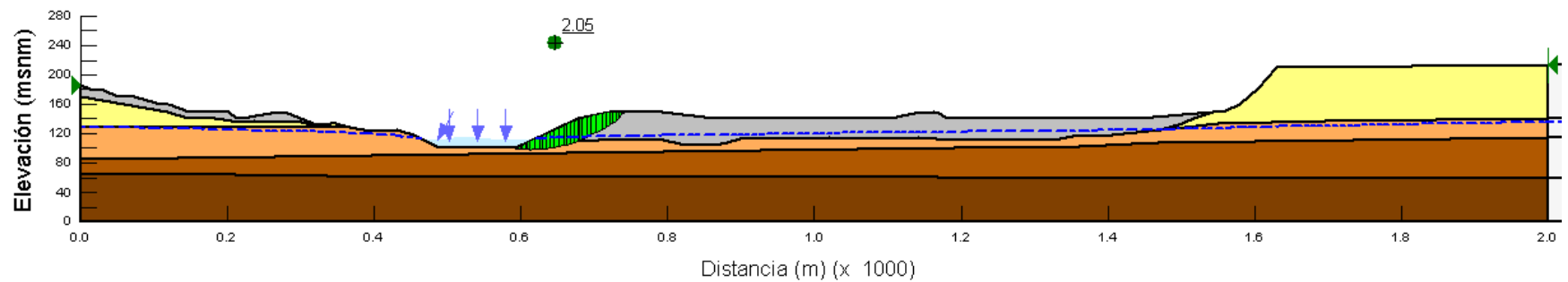


Figura 6-131. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-132. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

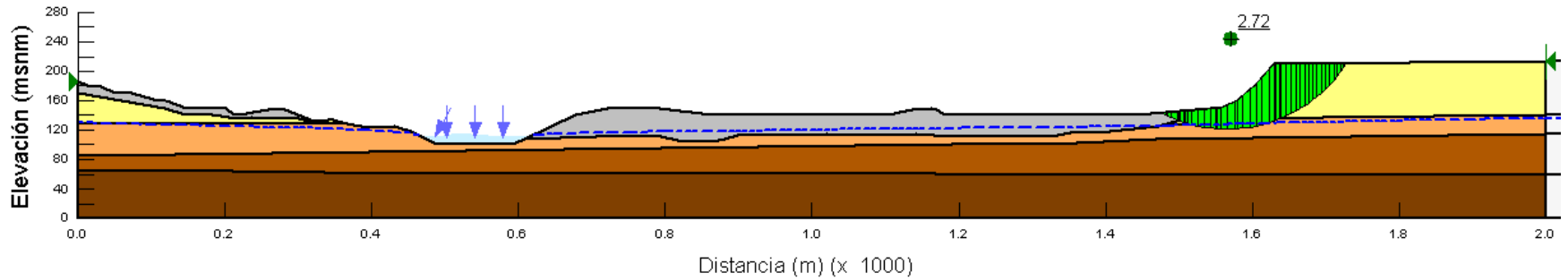
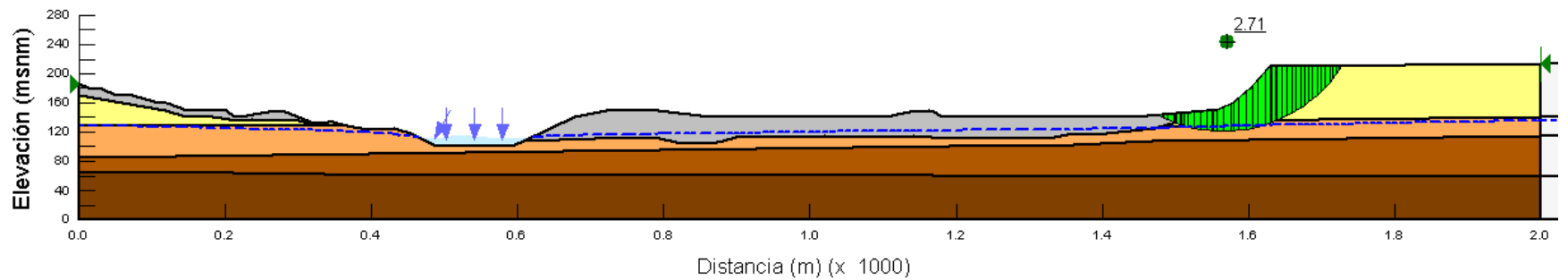


Figura 6-133. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-134. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)- Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro

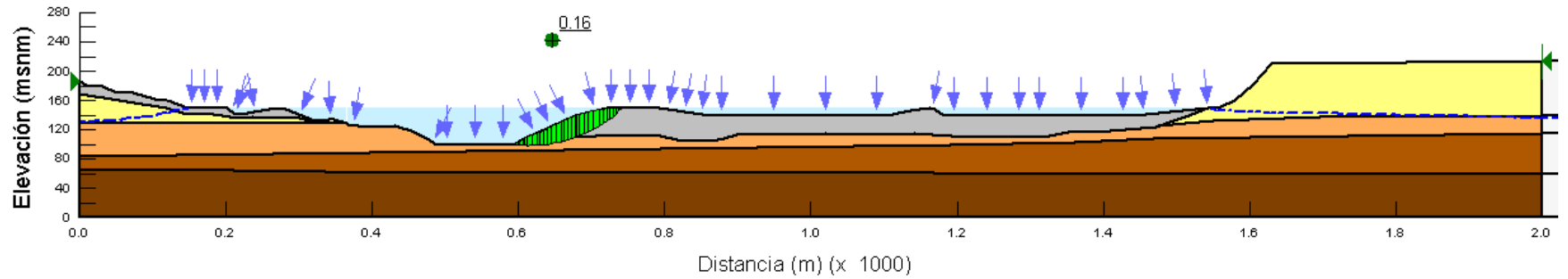
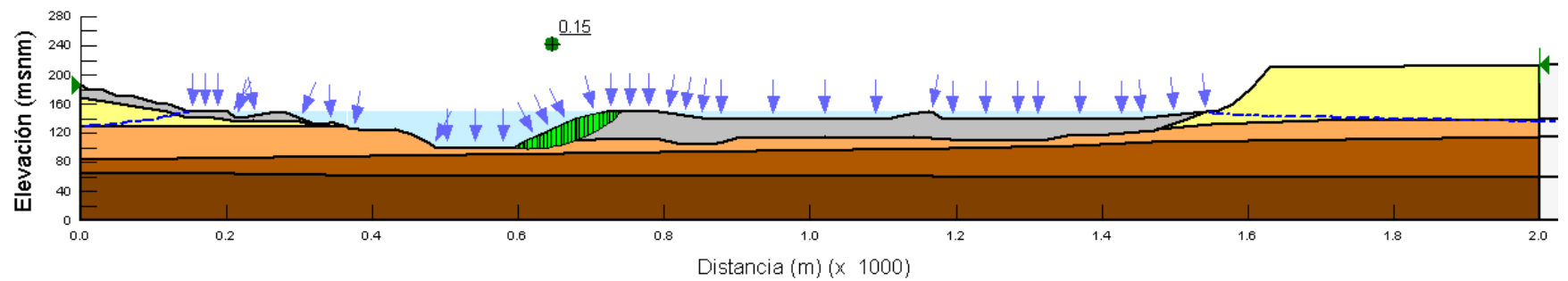


Figura 6-135. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-136. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_f = 34,40s$)- Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro

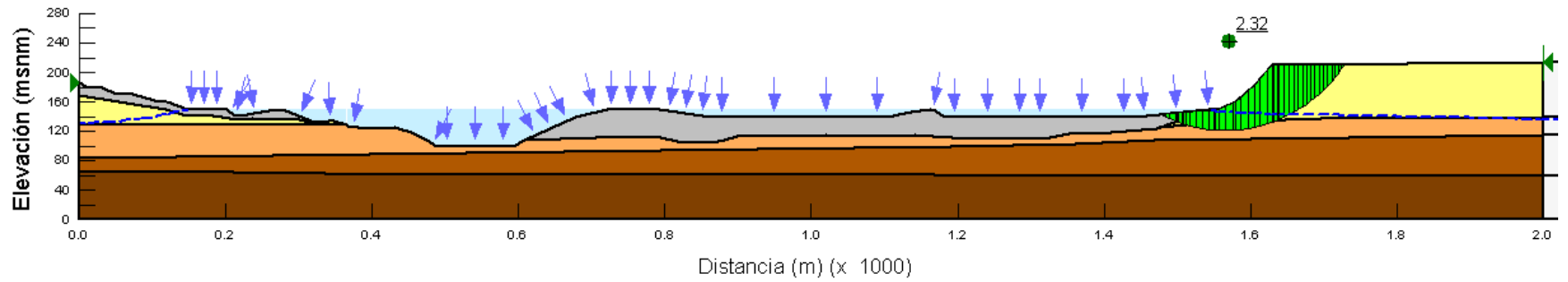
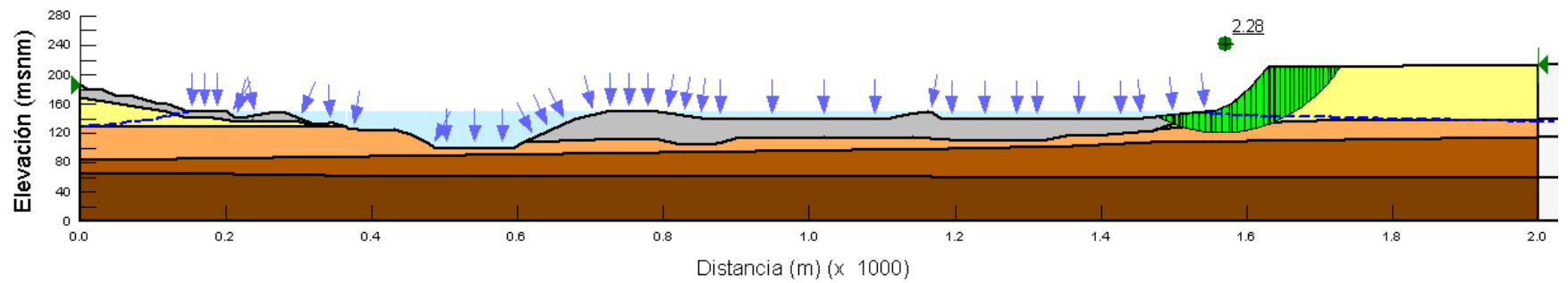


Figura 6-137. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala menor ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-138. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40s$) - Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro

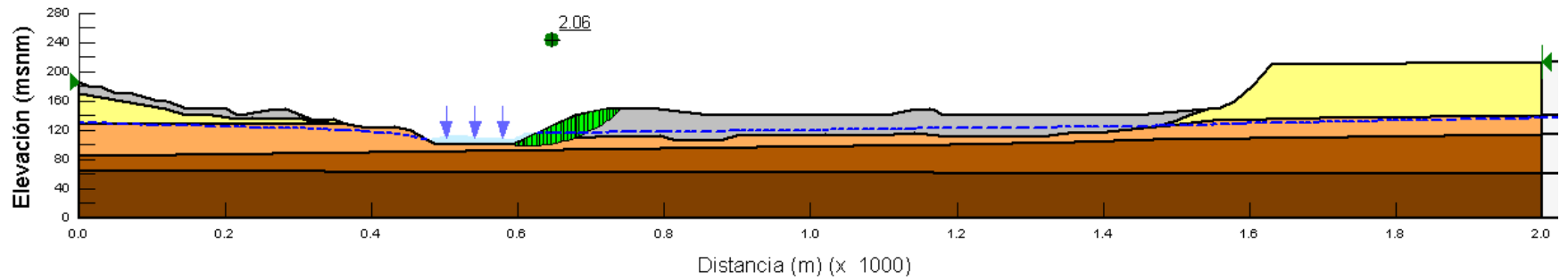
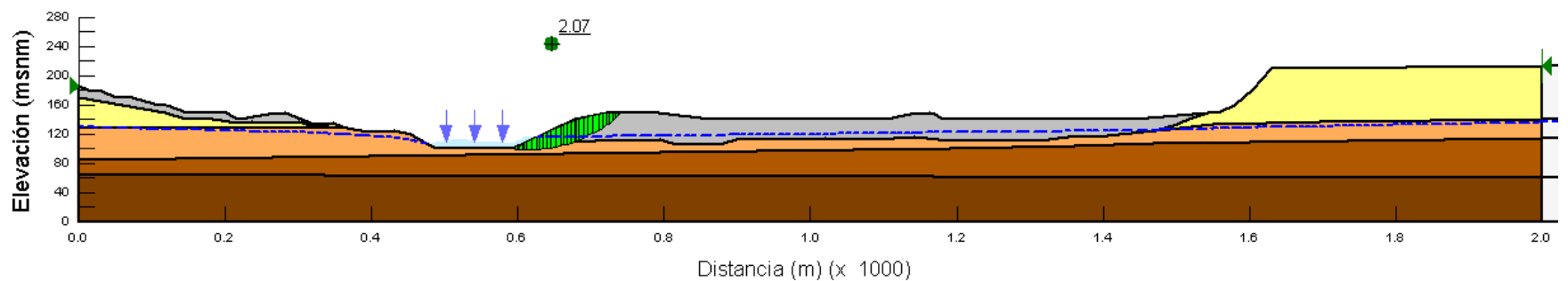


Figura 6-139. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-140. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40s$)- Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro

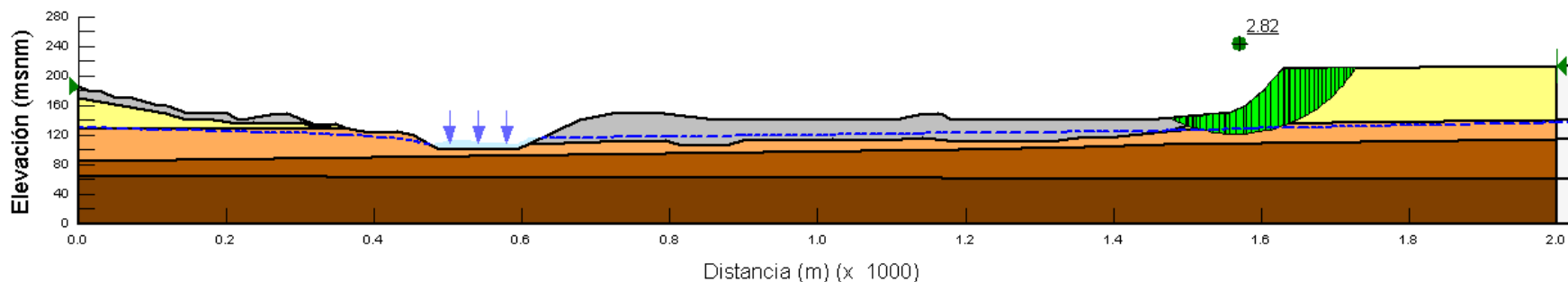
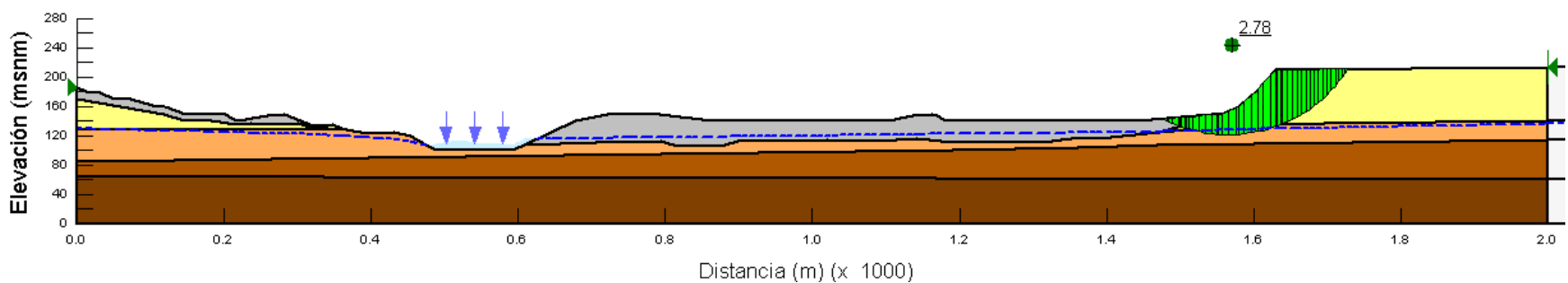


Figura 6-141. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Primer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-142. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40s$)- Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

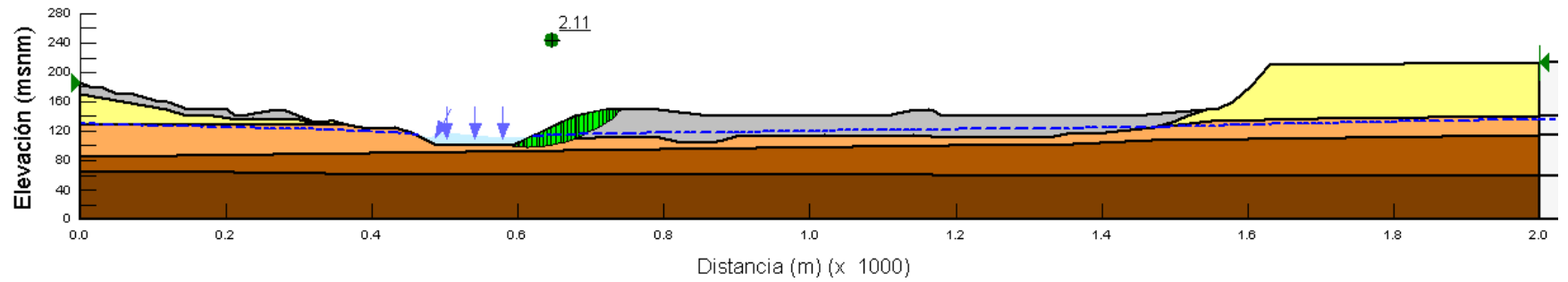
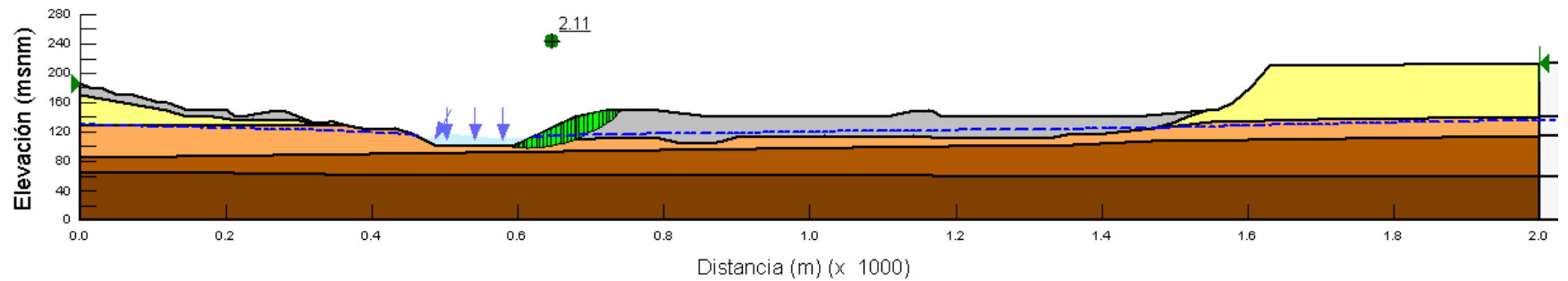


Figura 6-143. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-144. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40s$)- Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

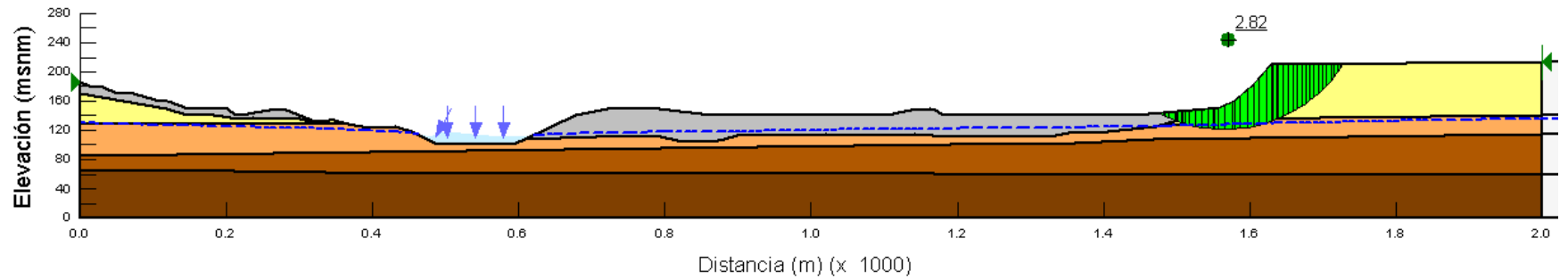
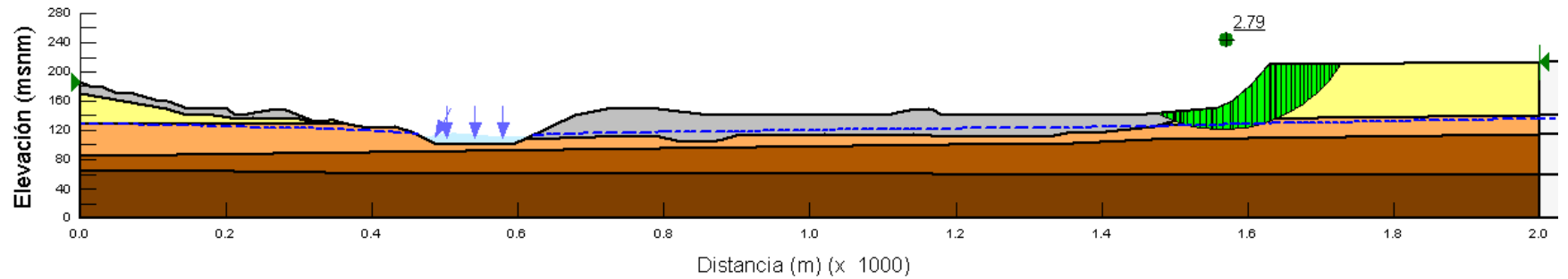


Figura 6-145. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Segundo incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-146. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40s$) - Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro

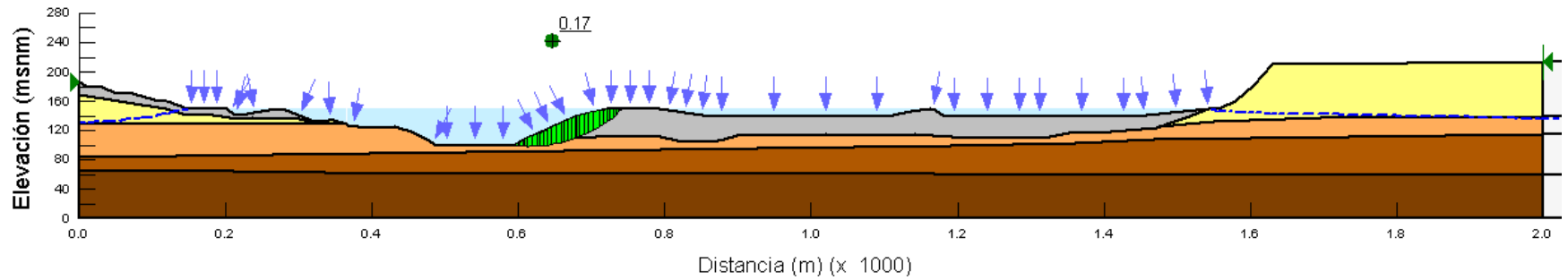
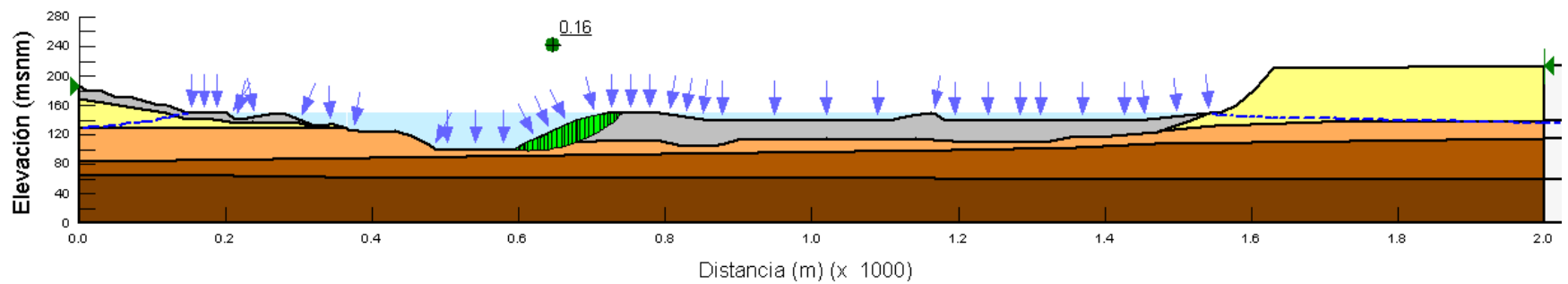


Figura 6-147. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_{ap}=21,66s$) - Cauce del río San Pedro – Tercer incremento del nivel del río San Pedro



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Figura 6-148. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_f = 34,40s$) - Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro

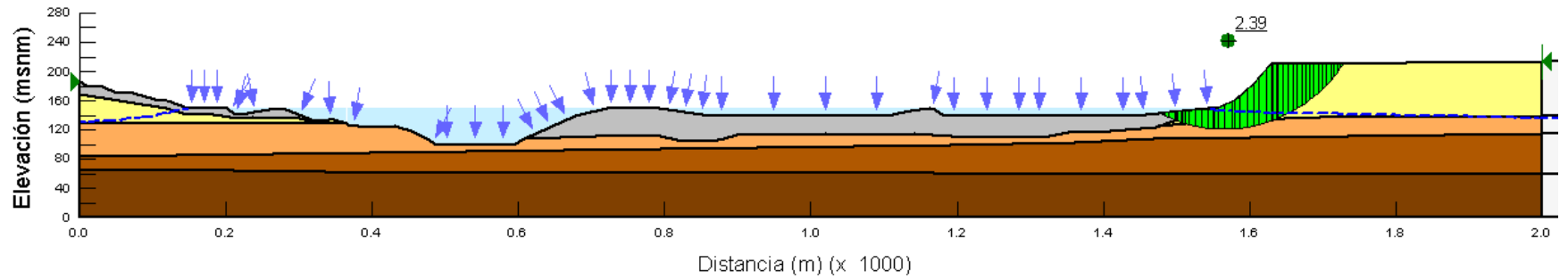
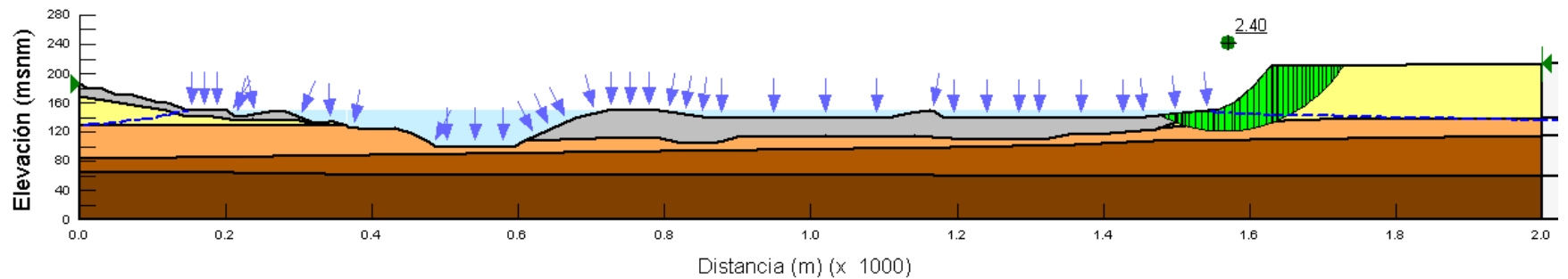


Figura 6-149. Análisis dinámico - Sismo Valparaíso escala mayor ($t_{ap}=21,66s$) - Escarpe principal Taco 3 – Tercer incremento del nivel del río San Pedro



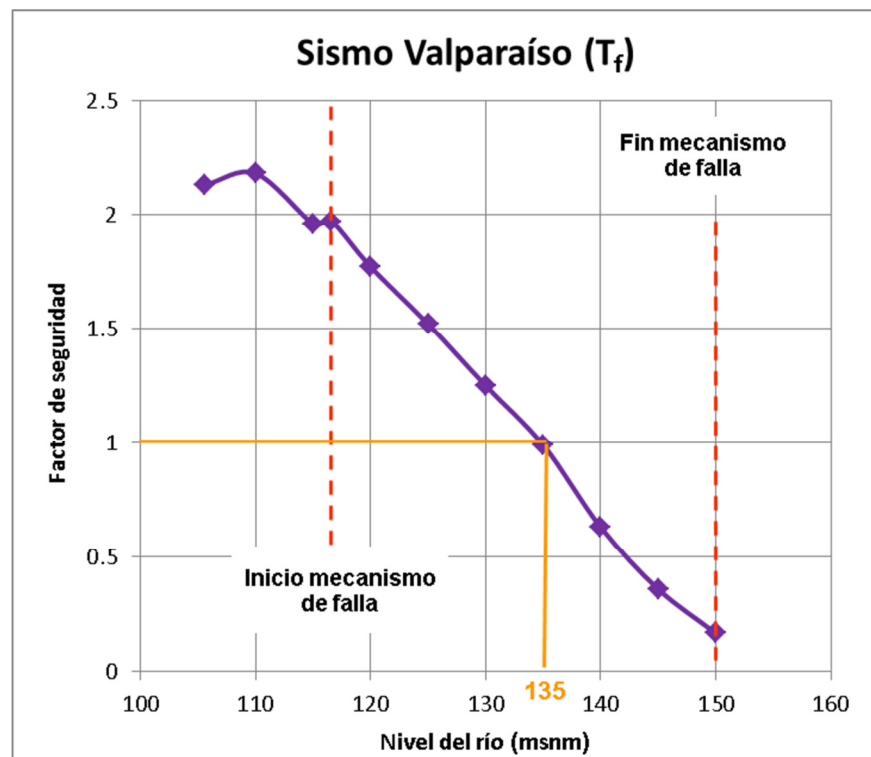
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

A partir de los factores de seguridad obtenidos, para cada análisis de estabilidad dinámico, es claro el cambio en el comportamiento de la ladera al existir una variación en el régimen de flujo. Como se observa en los cuadros anteriores, es notable la disminución del factor de seguridad con el cambio del nivel de agua del río San Pedro entre el segundo al tercer incremento, en el cual, la lámina de agua aumento 41,10 m. Durante este cambio el factor de seguridad para el tercer incremento se reduce aproximadamente a una décima parte del valor obtenido en el segundo incremento del nivel del río.

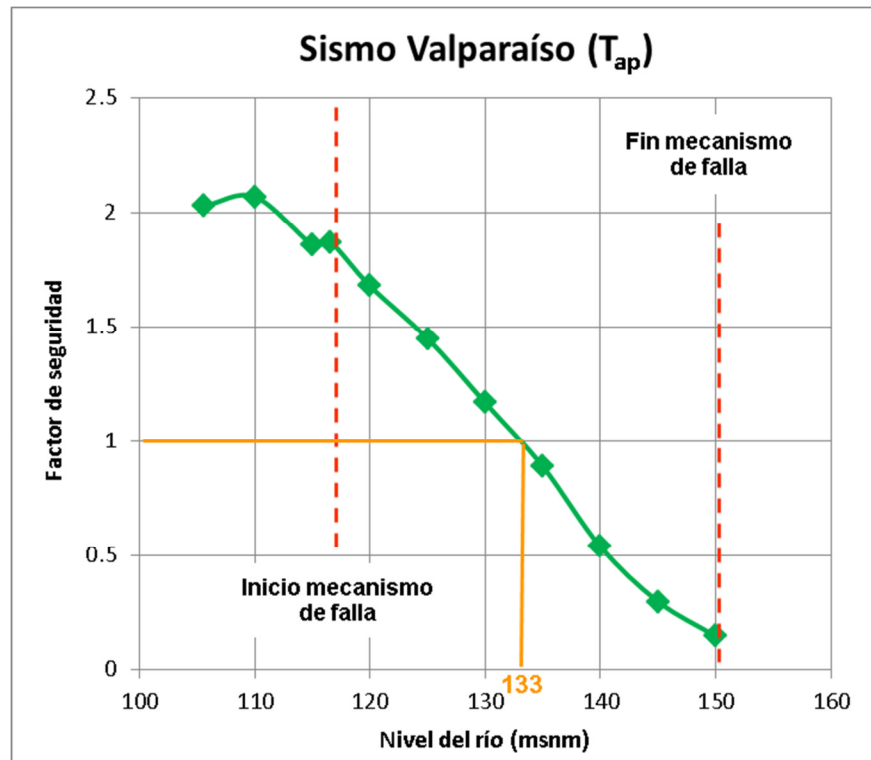
Sin embargo, al observar los factores de seguridad para un mismo régimen de flujo pero bajo diferentes aceleraciones, la discrepancia entre los valores obtenidos no es tan grande.

Por otra parte, debido a que la disminución del factor de seguridad entre el segundo y tercer incremento del nivel del río para el mecanismo de falla definido cerca del cauce da un salto tan abrupto, y con el fin de determinar el punto umbral de la estabilidad, se buscó el nivel del río para el cual el factor de seguridad dinámico, fuese igual a la unidad. En la Figura 6-150 y Figura 6-151 se presenta el análisis de sensibilidad realizado con la señal del sismo de Valparaíso para el tiempo final y aceleración pico, respectivamente.

Figura 6-150. Factor de seguridad vs Nivel de río – Sismo Valparaíso (Tiempo final de la señal del sismo = 34,40 s)



**Figura 6-151. Factor de seguridad vs Nivel del río – Sismo Valparaíso
(Tiempo en el cual se da la aceleración pico = 21,66 s)**



A partir del análisis de sensibilidad se determina que el nivel del río San Pedro para el cual el factor de seguridad es igual a la unidad (estado limite) se encuentra entre la EL. 133,00 msnm y la EL.135,00 msnm. El resumen de resultados para las cuatro señales de sismo analizadas se presenta en el Cuadro 6-5.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Cuadro 6-5. Resumen de resultados del análisis de sensibilidad del factor de seguridad con el incremento del nivel del río San Pedro

Señal	Nivel del río San Pedro (msnm)	Factor de seguridad obtenido					
		Cauce del río			Escarpe principal		
		Estático	Sismo	Sismo	Estático	Sismo	Sismo
		o	-t _f	-t _{ap}	o	-t _f	-t _{ap}
Sismo Valparaíso (t _f = 34,40s) (t _{ap} = 21,66s)	134	1,75	1,04	0,95	2,63	2,72	2,58
Sismo Tarapacá (t _f = 30,62s) (t _{ap} = 18,22s)	134	1,75	1,01	0,95	2,63	2,62	2,62
Sismo Valparaíso escala menor (t _f = 34,40 s) (t _{ap} = 21,66s)	135	1,76	0,97	0,96	2,62	2,66	2,66
Sismo Valparaíso escala mayor (t _f = 34,40 s) (t _{ap} = 21,66s)	133	2.27	1,05	1,00	2,64	2,59	2,56

t_f: Tiempo final de la señal del sismo
t_{ap}: Tiempo en el cual se da la aceleración pico.

A partir de los resultados obtenidos para las cuatro señales sísmicas analizadas, se deduce que la ladera del Taco 3 es estable hasta una altura de nivel de agua de 133 msnm, dado que es en este punto donde se genera el cambio en las condiciones del régimen de flujo y repercuten en el comportamiento dinámico del terreno.

6.6.5 Análisis de deformaciones mediante el método de bloque deslizante de Newmark

El procedimiento que utiliza el programa para estimar las deformaciones permanentes parte del análisis de respuesta dinámica, para luego realizar una estimación de las deformaciones permanentes utilizando el método de Newmark (1965).

Como la aceleración varía con el tiempo, el factor de seguridad dinámico también lo hará. Por tanto, para determinar las deformaciones permanentes se debe evaluar los factores de seguridad cuyo valor sean menores a la unidad. Considerando que cuando el factor de seguridad es menor a la unidad, la masa de falla potencial no estará más en equilibrio y consecuentemente, será acelerada por una fuerza, generando el desplazamiento de la masa.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

La suma de cada pequeña deformación permanente durante el sismo da como resultado la máxima deformación permanente de la falla, al final del movimiento.

El análisis de deformaciones se estimó en cada cambio del nivel del río San Pedro, utilizando únicamente el primer análisis de respuesta dinámica (señal del terremoto de Valparaíso, 2005). Los resultados de los factores de seguridad versus tiempo para el mecanismo de falla cerca del cauce del Río San Pedro y en el escarpe principal se presentan de la Figura 6-152 a la Figura 6-157.

Figura 6-152. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Cauce – Primer incremento del nivel del río San Pedro

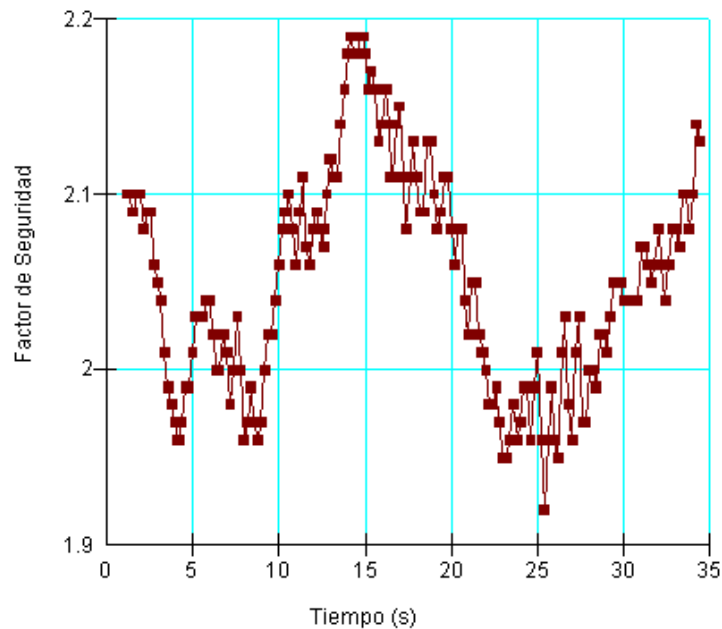


Figura 6-153. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Escarpe principal – Primer incremento del nivel del río San Pedro

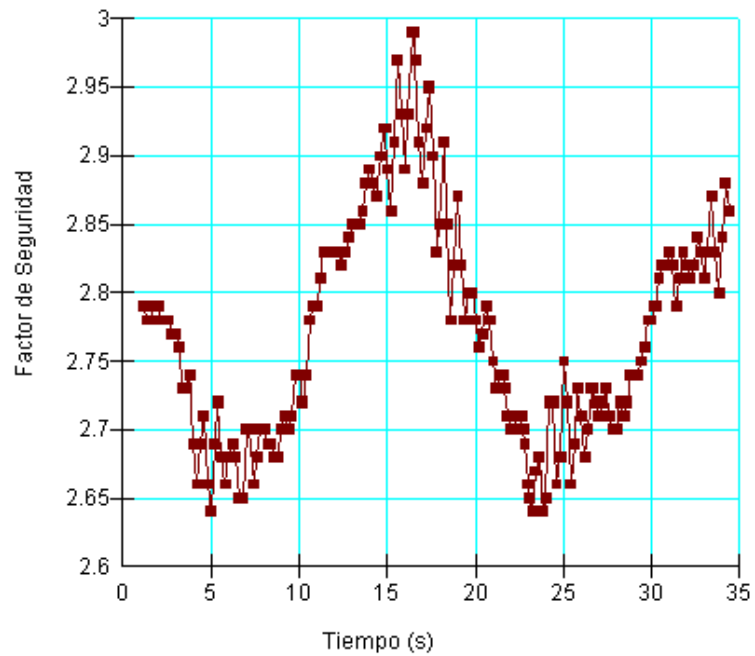


Figura 6-154. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Cauce – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

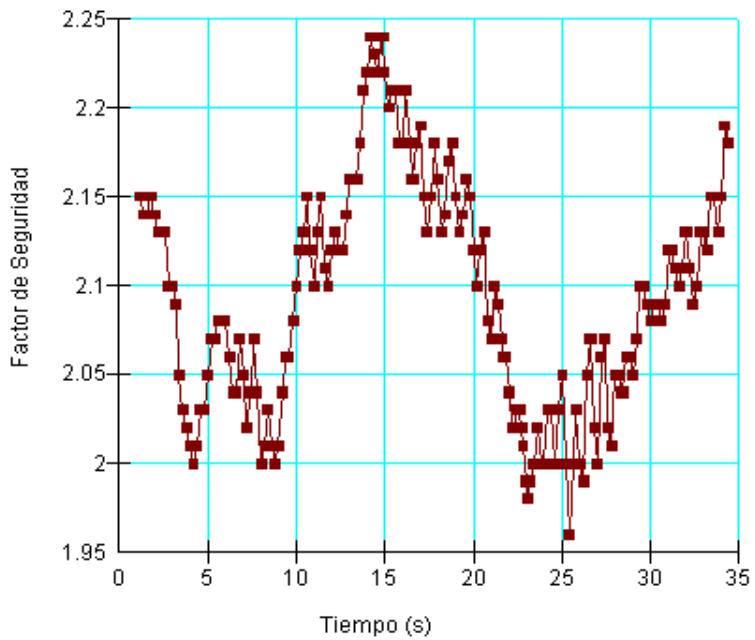


Figura 6-155. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Escarpe principal – Segundo incremento del nivel del río San Pedro

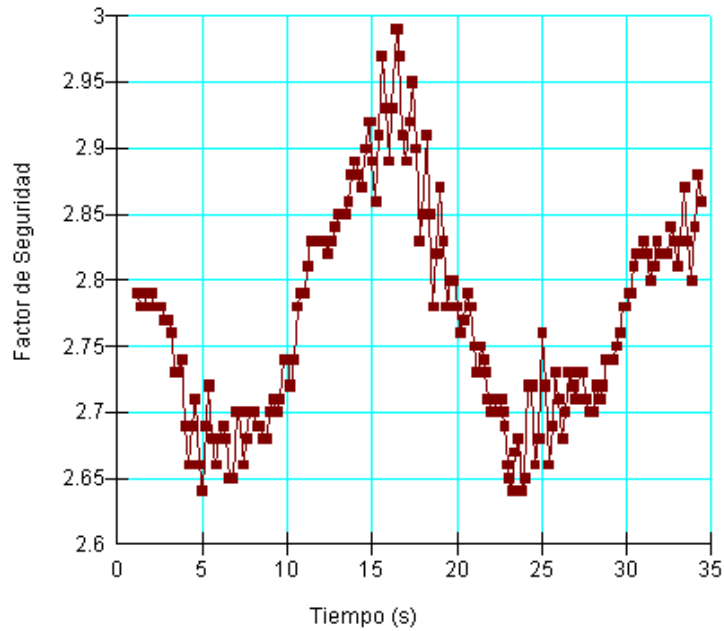
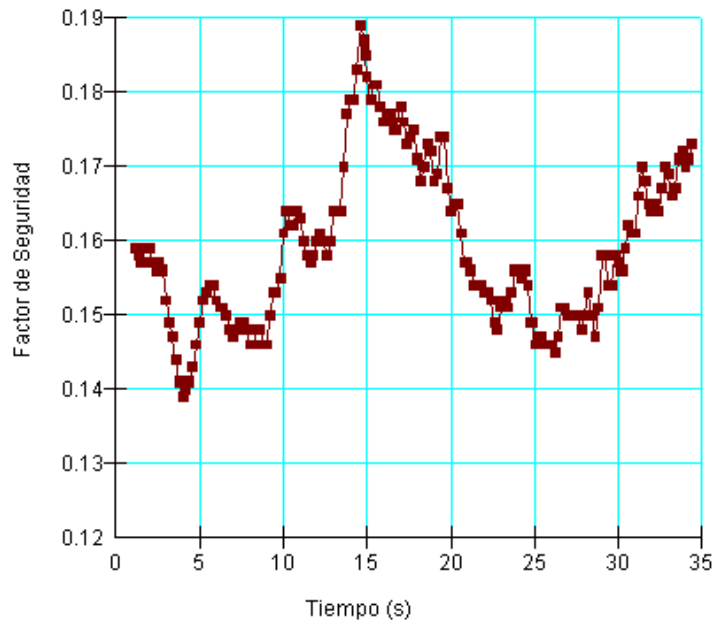
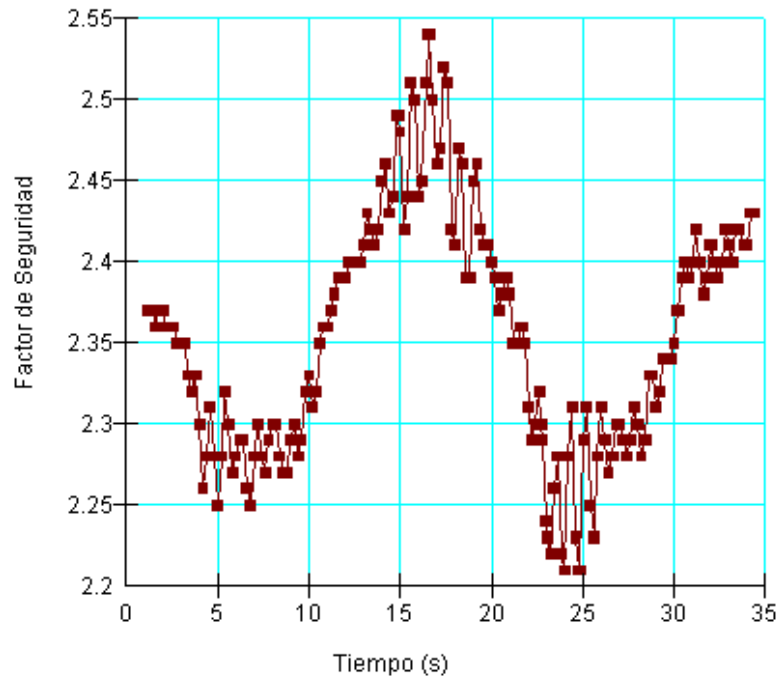


Figura 6-156. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Cauce – Tercer incremento del nivel del río San Pedro



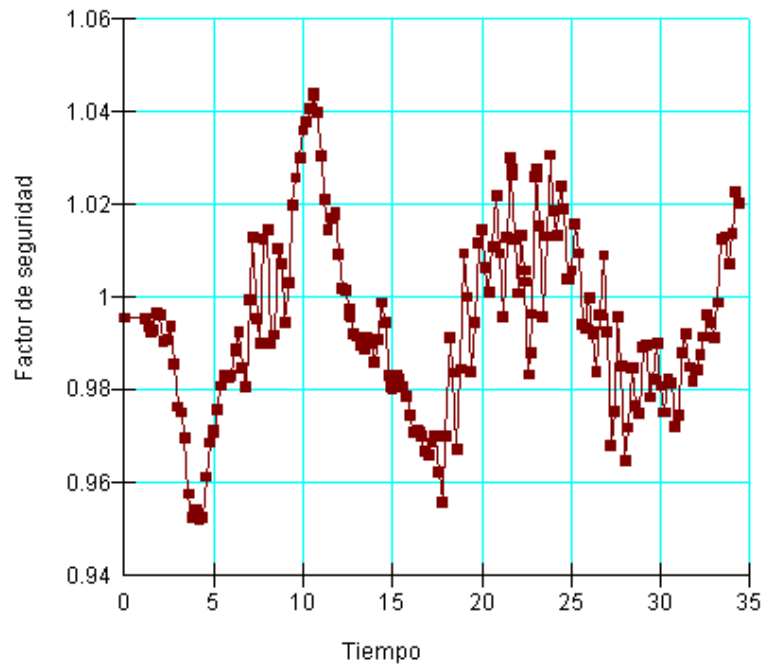
**Figura 6-157. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Escarpe principal –
Tercer incremento del nivel del río San Pedro**



De acuerdo con los factores de seguridad obtenidos para cada incremento del nivel del río San Pedro bajo el efecto de los sismos de diseño, el único mecanismo de falla en el cual se presentarían deformaciones es el definido cerca al cauce del río, debido a que los factores de seguridad obtenidos en dicha zona para el tercer incremento son menores a la unidad.

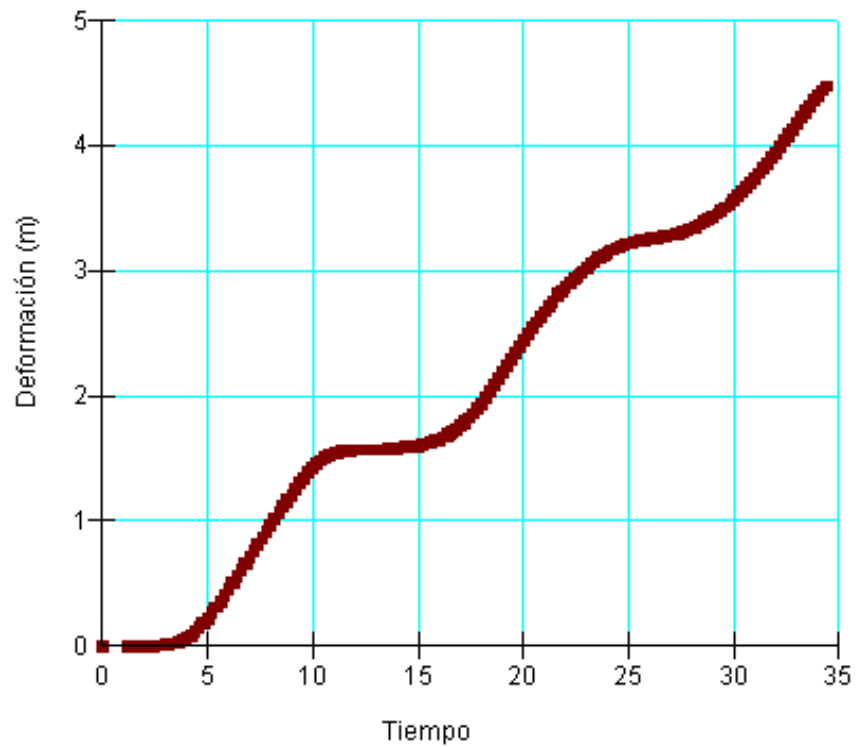
En contraposición al párrafo anterior, no se determinaron las deformaciones permanentes para el caso crítico (tercer incremento del nivel del río), sino para aquella condición en que el nivel del río llegaba a la EL. 133,00 msnm. Esto se debe a que allí el factor de seguridad dinámico es igual a la unidad (véase Figura 6-158) para una aceleración crítica de 0,09 g.

Figura 6-158. Factor de seguridad vs. Tiempo en el Cauce del río – Nivel del río en la EL.133 msnm



Con los programas QUAKE/W y SLOPE/W, se determinaron las deformaciones permanentes utilizando el método del bloque deslizante de Newmark. Las deformaciones calculadas en la zona cercana al cauce del Río San Pedro para la condición límite se presentan en la Figura 6-159.

Figura 6-159. Deformación versus tiempo



De la figura anterior se observa que el desplazamiento total sería del orden de 4,5 m.

7. CONCLUSIONES

- A partir de los estudios realizados para la ladera del Taco 3 en su condición natural, es decir, antes del deslizamiento generado por el evento sísmico del 22 de mayo de 1960, que involucró el desplazamiento de 32 millones de m³ de volumen de tierra, se determinaron los factores que indujeron a la falla de la ladera, entre los cuales se encuentra los movimientos cíclicos producto del sismo, la licuación de los estratos limosos y la pérdida de confinamiento por los movimientos retrogresivos.

Al analizar las posibles causas del mega deslizamiento, se encontró que para que la ladera del Taco 3 fallara de manera inmediata debido al movimiento ocasionado por el terremoto de Valdivia, se requeriría una aceleración horizontal de aproximadamente 0,61g con la cual el factor de seguridad en condición pseudoestática obtenido fuera cercano a la unidad. Sin embargo, con los análisis realizados en el presente trabajo de investigación y considerando los diferentes estudios sísmicos realizados en el área, el coeficiente de aceleración horizontal promedio ha sido estimado en 0,22g con un valor máximo de 0,31g.

Sin embargo, dado la complejidad de este movimiento, se consideró que la evaluación de la estabilidad por el método de equilibrio límite, que tiene en cuenta la estabilidad de cuerpo rígido sin considerar el estado de esfuerzos ni deformaciones, podría no ser suficiente para la evaluación de la pérdida de resistencia al corte de los estratos que conforman la ladera, y que causaron el deslizamiento. Debido a esta limitante, se llevó a cabo un análisis de estabilidad dinámico por el método de elementos finitos utilizando el programa QUAKE/W[®], obteniendo como resultado factores de seguridad entre 5,0 a 3,8, valores muy por encima de la unidad.

Por lo tanto, se concluyó que las fuerzas sísmicas que experimentó la ladera del Taco 3 por el sismo de del 22 de mayo de 1960 no pudieron generar el deslizamiento de esa gran masa de suelo, dado que bajo estas cargas dinámicas la estabilidad de la ladera sigue siendo satisfactoria.

Adicionalmente, se analizó si los movimientos retrogresivos observados en la zona pudieron incidir en el mega-deslizamiento del Taco 3, causando una pérdida de confinamiento del suelo, al existir desplazamientos dentro del cuerpo de la ladera. De los resultados obtenidos del análisis por el método de elementos finitos en el programa SIGMA/W[®], se definió que el cambio en el estado de esfuerzos y deformaciones esperado no es significativo y

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

no tuvo mayor influencia en la pérdida por confinamiento de los estratos que conforman el Taco 3, y por ende consecuencias en su estabilidad.

Debido a lo anterior, y con una probabilidad de licuación del 54% en la interface de los estratos de limo de alta plasticidad (MH) y limo de baja plasticidad (ML) localizados a una profundidad aproximada de 105 m (medida a partir de la elevación del escarpe principal), se concluye que el factor principal que indujo la falla en el Taco 3 fue la licuación que experimentaron estos estratos, reduciendo su resistencia hasta tal punto que el suelo no fue capaz de resistir su propio peso y se produjeron los deslizamientos.

Esta teoría concuerda con lo establecido en los estudios realizados por G. Noguera y E. Garcés (1990), quien atribuye como principal causa del mega deslizamiento la licuación de los estratos finos lacustres.

- Para la evaluación de la influencia del cambio en el régimen de flujo de agua en el comportamiento de laderas, se contempló analizar un aumento súbito de los niveles normales del río San Pedro, ocasionado por deslizamientos de sectores potencialmente inestables localizados en el filo de aguas abajo de dicho deslizamiento, cerca de un estrechamiento del río.

Debido a lo anterior y basado en el nivel de aguas con el que posiblemente se represó el río San Pedro durante el sismo de Valdivia del 22 de mayo de 1960, se evaluaron tres niveles de incremento del río con respecto al nivel normal actual cerca del Taco 3 (EL.100,00 msnm):

- ✓ El primer incremento del nivel del río se estableció a la cota 105,9 msnm, con un aumento del 5% respecto al nivel actual del mismo.
- ✓ El segundo incremento del nivel del río se proyectó para un aumento del 10% respecto al nivel actual, lo que equivale a un posible embalse con nivel de aguas en la EL.110,00 msnm.
- ✓ Finalmente, el tercer incremento del nivel del río se estableció para un nivel de embalse en la elevación 150 msnm. Lo anterior, equivale a un aumento del 50% respecto al nivel actual.

Con la simulación de los tres incrementos del nivel del río San Pedro en el programa SEEP/W[®] se obtuvo que las líneas de flujo se dirigen de los extremos hacia el cauce, lo cual era el comportamiento esperado. Pero al llegar a un nivel de 136,00 msnm el flujo cambia de dirección.

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

Lo anterior se debe a que con el aumento en la lámina de agua, la cabeza total en el cauce se incrementa hasta el punto en que supera a la cabeza total en los extremos, generando el cambio en la dirección del flujo.

En cuanto al comportamiento en las cabezas de presión, se observa que para el primer y segundo incremento en el nivel del río los valores son muy similares dado que el cambio en el nivel del embalse es de 4,4 m. Mientras que para el tercer incremento las cabezas de presión cerca del cauce aumenta a 20 m debido al cambio en la cabeza total en esta zona.

- Del análisis de la respuesta dinámica del Taco 3 con el cambio en el régimen de flujo se observa que la estabilidad en la ladera depende de las variaciones en las condiciones de flujo.

En el análisis de esfuerzos y deformaciones se observó que la mayor variación en los esfuerzos efectivos se debe al cambio en el régimen de flujo, dada la disminución de los esfuerzos a partir del tercer incremento en el nivel del río. Esta disminución en los esfuerzos efectivos se debe a la saturación del suelo por el aumento en el nivel del agua, pues al actuar las cargas sísmicas en el material saturado, se genera un incremento en la presión de poros y, por ende, la reducción en los esfuerzos efectivos. Lo anterior es lo que se denomina como licuación de los estratos, que ocasiona deformaciones excesivas como resultado de las repetitivas perturbaciones y por lo que los desplazamientos horizontales obtenidos en esta modelación se encontraron en el rango de 20 a 90 cm.

Al igual que los resultados obtenidos para el análisis de esfuerzos y deformaciones, el análisis de estabilidad dinámico evidenció la disminución de los factores de seguridad en el mecanismo de falla cercano al cauce del río (por debajo de la EL130,00 msnm) con el cambio del nivel de agua del río San Pedro, disminuyéndose el valor a una décima parte entre el segundo y tercer incremento.

Sin embargo, al observar los factores de seguridad para un mismo régimen de flujo, pero bajo diferentes aceleraciones, la discrepancia entre los valores obtenidos no es tan grande.

Con lo anterior se puede concluir que el cambio en el régimen de flujo en la ladera del Taco 3 reduce los factores de seguridad en un estado estático y condiciona su estabilidad bajo fuerzas dinámicas. Por lo tanto, la aceleración crítica requerida para obtener un factor de seguridad igual a la unidad (0,09g) cuando el suelo se satura con el cambio de nivel de agua es mucho menor al obtenido bajo condiciones normales (0,61g).

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

- El nivel del río San Pedro para el cual se llega a la condición límite de estabilidad dinámica en la ladera del Taco 3, es decir, para el que el factor de seguridad es igual a la unidad corresponde a la elevación 133 msnm. Dicho nivel se encuentra 33,0 m por encima del nivel de agua normal del río San Pedro.
- Del análisis de estabilidad estático, se observó que para las diferentes condiciones de incremento en el nivel del río San Pedro, no se podía apreciar un cambio detallado en el desarrollo de los factores de seguridad a medida que el nivel del agua va subiendo dentro del cauce hasta alcanzar la altura de la ladera. Por lo cual se realizó un análisis de sensibilidad con diferentes ascensos en el nivel del río.

Se observó que al inicio del mecanismo de falla el factor de seguridad disminuye con el aumento del nivel de agua del río, hasta llegar al punto medio de la falla donde la lámina de agua se encuentra a la EL. 130,00 msnm con un factor de seguridad de 1,73. Posteriormente, el incremento en el factor de seguridad es proporcional al ascenso del nivel del río.

El comportamiento anterior se debe a que el agua, aunque aplique una fuerza que favorece a la estabilidad, es ella misma quien satura la parte inferior de la masa potencial deslizante y produce una reducción en el peso neto de las dovelas resistentes, haciendo que el efecto estabilizante de la fricción disminuya. Esta disminución continúa hasta que las fuerzas se equilibran y la fuerza hidrostática del agua continua aumentando, incrementando los factores de seguridad. (Véase Figura 6-20).

- Para la condición límite, es decir, con un posible represamiento del río en la EL. 133,00 msnm, para una aceleración crítica de 0,09g, el desplazamiento total es del orden de 4,5 m.

8. REFERENCIAS

- 1) Alva Hurtado, J. y Orihuela, P. (1982). Estudio de Licuación y Amplificación Sísmica en Chimbote, Perú. IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Chiclayo, Perú.
- 2) An Introductory QUAKE/W Example Olson, S.M., and Stark, T.D. (2002). Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories. Canadian Geotechnical Journal, 39: 629–647.
- 3) Ariztía, J. y Vicuña, A. (1968). Deslizamientos en el Riñihue. 21 de mayo de 1961. Santiago de Chile.
- 4) Barragán, L. (2008). Manual para el análisis sísmico de estabilidad de taludes utilizando métodos pseudoestáticos y métodos de desplazamiento. Facultad de ciencias Físico - Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- 5) Berg, G.V. and Husid R. (1973). Structural Behavior in the 1970 – Peru Earthquake”. 5th World Conference in Earthquake Engineering. Rome. Italy.
- 6) Bowles, J.E. (1988). Foundation analysis and design, Mc Graw Hill, 4 edition, 1024 pp.
- 7) Carrillo, Gil A. (1970). Algunas estimaciones del comportamiento del suelo durante el terremoto de Ancash. II Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Lima-Perú.
- 8) Centro Sismológico Nacional (CSN). Universidad de Chile. www.sismologia.cl
- 9) Craig, R.F. (2004). Craig’s soil mechanics. Spon Press, 7th edition, 464 pp.
- 10) Crempein, J. (2001). Un modelo de atenuación para aceleraciones máximas de terremotos en la zona central de Chile, Documento de trabajo No.44. Universidad de los Andes.
- 11) Cluff, L.S. (1971). “Peru Earthquake of May 31, 1970. Engineering Geology Observations”. Bulletin of Seismologic Society of America. Vol. 61 No. 3, pp 511-534.
- 12) Corporación Hidrotécnica y C. Lotti & Asociados (1979). Estudio de Factibilidad del Sistema General de Abastecimiento de Agua Dulce a Bayóvar. Organismo de Desarrollo del Complejo Bayóvar. ODECOB, Febrero.

- 13) Das, B. (1999). Principles of foundation engineering. PWS, 4 edition, 862 pp.
- 14) Davis, S. y Karzulovic, J. (1961). Deslizamientos en el Valle del río San Pedro Provincia de Valdivia Chile. Santiago de Chile.
- 15) Duncan J.M., Peter Byrne, Kai S. Wong and Phillip Mabry. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses. Report No. UCB/GT/80-01. Office of Research Services. University of California. Berkeley, California. August, 1980.
- 16) Duncan, J. y C. Chang (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Proc.ASCE Soil Mech. Found. Div. 96, 1629-1654.
- 17) Fischer, T., Alvarez, M., De la Llera, J.C., Riddell, R. (2002), “An Integrated Model for Earthquake Risk Assessment of Building”. Journal of Engineering Structures.
- 18) GEO-SLOPE International Ltd (2011), QUAKE/W Tutorial and examples.
- 19) Gómez López de Munain, R, s.f.. El desastre de Vaiont. Jornadas técnicas sobre estabilidad de laderas en Embalses.
- 20) González, A.J. (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT, X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá, Colombia.
- 21) Gutiérrez, G. A. (2002). Aceleración crítica en casos históricos de deslizamientos por sismos. Universidad nacional de Colombia, Bogotá.
- 22) Hara, A., Ohta, T., Niwa, M., Tanaka, S. & Banno, T. (1971). “Shear modulus and shear strength of cohesive soils”. Soils and Foundations. pp: 1 - 12.
- 23) Hwang, J.H., Yang, C.W., Juang, D.S. (2004). A practical reliability-based method for assessing soil liquefaction potential. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 24: 761-770.
- 24) Katsuyuki ABE (1979), Size of great earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data. Journal of geophysical research. Volume 84, Issue B4, pp. 1561-1568, 10 April 1979.
- 25) Martin, A. (1990). Hacia una nueva Regionalización y Cálculo del Peligro Sísmico en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

- 26) Mora, S. & Yasuda, S. Licuefacción de suelos y fenómenos asociados durante el terremoto de Limón. *Revista geológica de América central*, vol. Esp. Terremoto de Limón: 121-132.
- 27) Moreno, T. & Gibbons W. (2007). *The Geology of Chile*. The Geological Society. London.
- 28) Morimoto, R., Koizumi, Y., Matsuda, T., Hakuno, M. and Yamaguchi, I. (1971). *Seismic Microzoning of Chimbote Area, Peru*. Overseas Technical Corporation Agency. Government of Japan, March.
- 29) Museo histórico Nacional de Chile. Departamento Educativo. *Terremoto y Tsunami de Valdivia (1960)*. www.museohistoriconacional.cl.
- 30) NAVFAC (1982a). DM7.2, Foundations and Earth Structures. U.S. Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, 200 Stovall Street, Alexandria, VA 22332, p. 7.2-209.
- 31) Newmark, N.M. (1965). Effects of Earthquakes and Dams and Embankments. *Geotechnique*, Vol. 15. No. 2, pp. 139-160.
- 32) Noguera, G. y Garcés, E. (1990). *Deslizamientos en el río San Pedro Analizados 30 años después*. Santiago de Chile.
- 33) Plakfer, G., Ericksen, G.E. and Fernández-Concha, J. (1971). Geological Aspects of the May 31, 1970, Peru Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 61 No. 33, pp 543-578.
- 34) Rodríguez, C., Pérez, Y., Moreno, H., Clayton, J., Antinao, J.L., Duhart, P., Martin, M. (1999). *Área de Panguipulli – Riñihue, Región de Los Lagos*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas geológicos, No.10. Santiago.
- 35) Santana, G. et al (1991). Registros de aceleraciones del terremoto de limón, 22 de Abril de 1991. Laboratorio de ingeniería sísmica, Instituto de investigaciones de Ingeniería. Universidad de Costa Rica.
- 36) Seed, H.B. and Idriss, I. M. (1970), Moduli and damping factors for Dynamic analysis cohesionless soils. *J. Geotechnical Engineering, ASCE*, 112(1): 1016-1032.
- 37) Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. and Chung, R.M. (1985). The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation. *J. Geotechnical Engineering, ASCE*, 111(12):1425–45.
- 38) Sepúlveda, A. (2011). *Comportamiento sísmico de taludes de roca. Aplicación del método de Newmark*. Universidad Politécnica de Madrid.

- 39) SERNAGEOMIN (2003). Mapa geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Digital No.4. Santiago.
- 40) Sowers, G. F. (1979). Introductory Soil Mechanics and Foundations. 4th edition. Macmillan, 621 pp, New York.
- 41) Stroud, M. A. (1974). The standard penetration test in insensitive clays and soft rock. Proceedings of the 1st European Symposium on Penetration Testing, Sweden: Stockholm, vol. 2(2), 367-375.
- 42) Suarez, J. (2013). Deslizamientos. Cap. 7 – Comportamiento Sísmico de los Taludes. Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- 43) Suarez, J. Deslizamientos en el llenado de embalses. Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- 44) Terzaghi, K. y Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley. New York.
- 45) United States Geological Survey (U.S.G.S.). Bases de datos de sismicidad mundial. www.usgs.gov.
- 46) Wilson R. C., Keefer D. K. (1985). “Predicting area limits of earthquake induced Landsliding”. In Ziony, J.I. (Ed) Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region- An Earthscience Perspective U.S. Geological Survey Professional Paper, vol 1360, pp 316-345.
- 47) Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I. et al. (2001). “Liquefaction resistance of soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 127(10), pp 817-833.
- 48) Zhang, J., Andrus, R., Hsein, J. (2005). “Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 131, No.4.

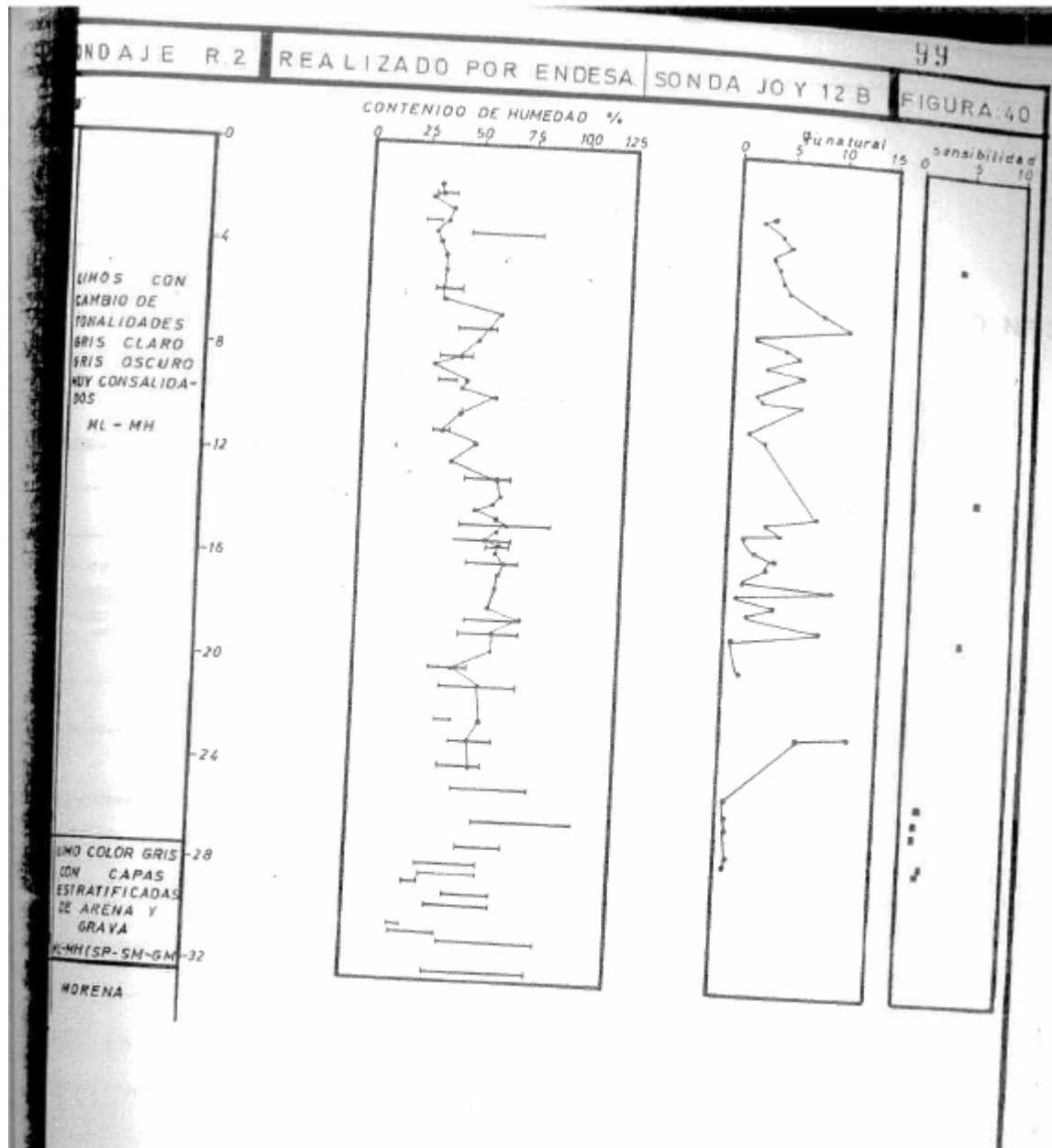
ANEXOS

**ANEXO A – Ensayos de laboratorio (Tomado de
Ariztía y Vicuña (1968))**

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

REGISTROS LITOLÓGICO Y ENSAYOS DE PROPIEDADES INDICE

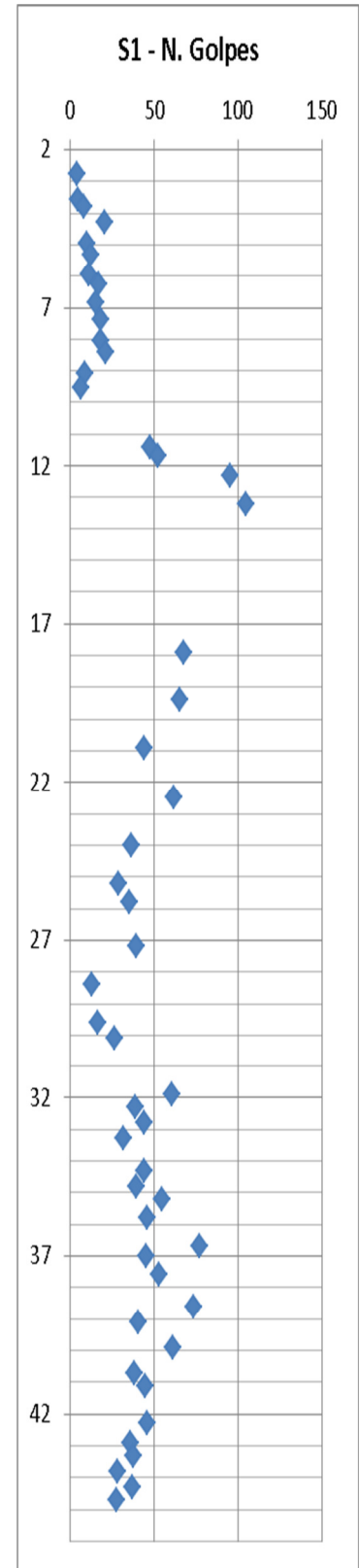
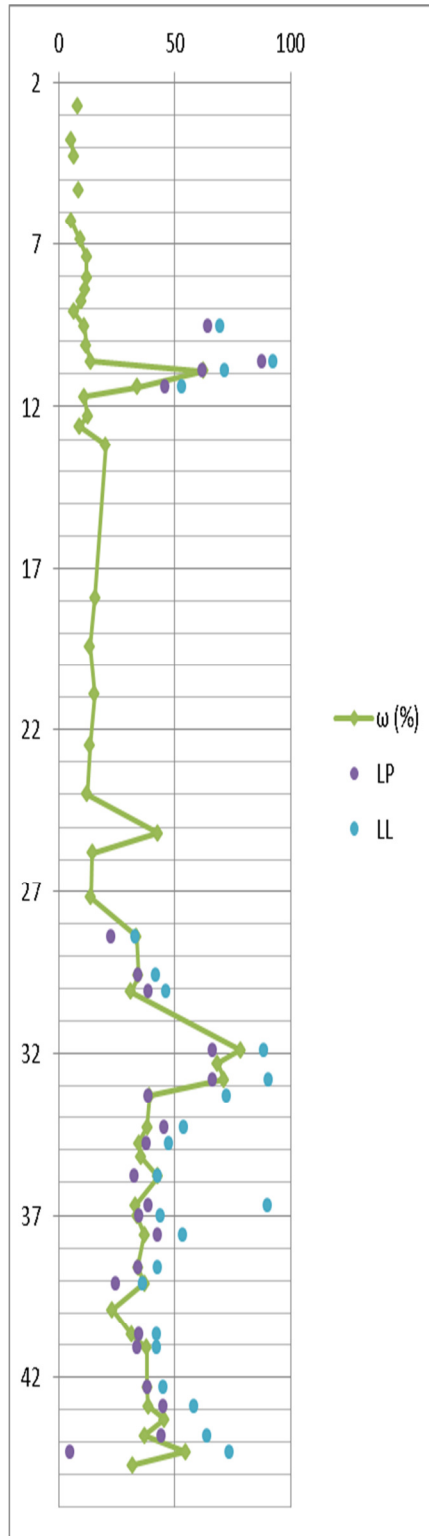
SONDAJE R2



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

SONDAJE S1 (Modificado de Ariztía y Vicuña (1968))

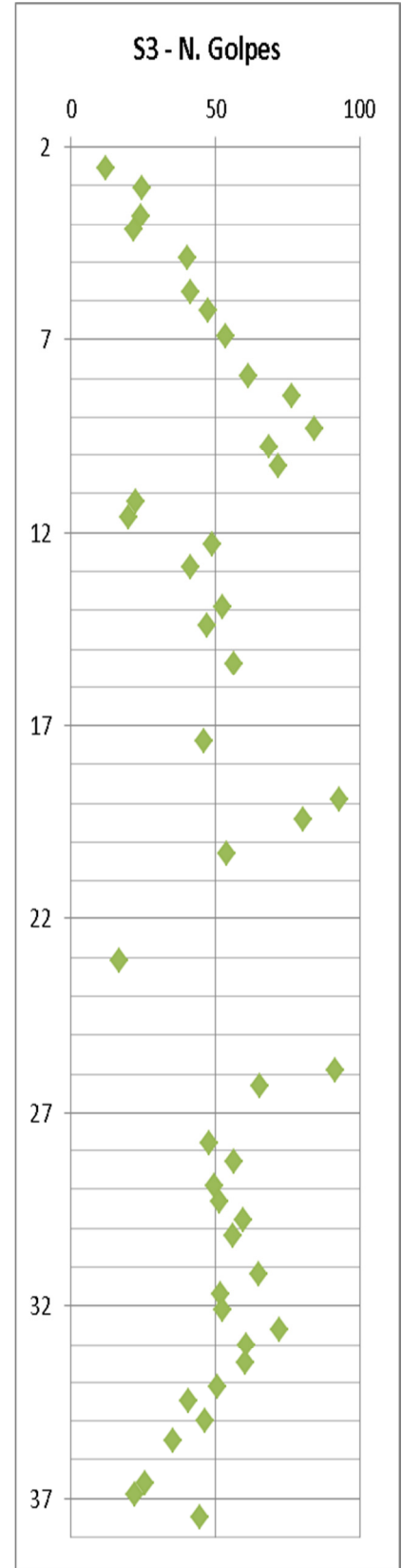
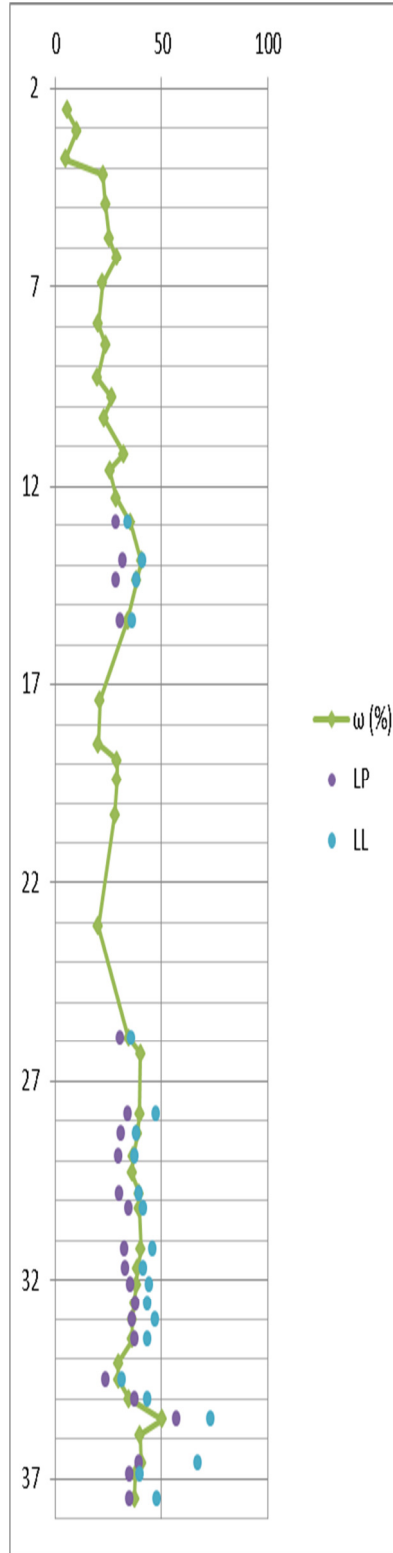
Descripción	Profundidad
Ripio arenoso con algo de limo y bolones	2.75
	3.59
	3.8
	4.28
	4.97
5.31	
5.95	
Zona de materiales revueltos	6.28
	6.86
	7.4
	8.03
8.41	
GP-SW-SM-SP	8.78
	9.09
	9.55
Limos remoldeados con algo de arena	10.1
	10.6
	10.9
Arenas limosas con grava y bolones.	11.4
	11.7
	12.3
	12.6
SM-GP	13.2
	17.9
Zona de materiales revueltos, conglomerado ripio arenoso y algo de arcilla tipo CL	19.4
	20.9
	22.5
	24
	25.2
	25.8
	27.2
28.4	
Limos perturbados con algo de arena y gravas dispersas	29.6
	30.1
	31.9
	32.3
32.8	
33.3	
34.3	
34.8	
35.2	
35.8	
36.7	
37	
Limos consolidados no perturbados ML-MH	37.6
	38.6
	39.1
	39.9
	40.7
	41.1
	42.3
	42.9
	43.3
	43.8
	44.3
44.7	



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

SONDAJE S3 (Modificado de Ariztía y Vicuña (1968))

Descripción	Profundidad	
Ripio arenoso de limo GP - GW	2.55	
	3.07	
	3.78	
Arenas limosas estratificadas SM (SW-SM)	4.16	
	4.9	
	5.78	
	6.26	
	6.93	
	7.94	
	8.46	
	9.3	
	9.78	
	10.3	
Limos arenosos no plásticos ML	11.2	
	11.6	
	12.3	
	12.9	
	13.9	
Limo gris oscuro ML	14.4	
	15.4	
	17.4	
	18.5	
	18.9	
	19.4	
	20.3	
	23.1	
	25.9	
	Limos gris claro - oscuro con delgadas capas de arena suelo remoldeado ML	26.3
		27.8
		28.3
		28.9
29.3		
29.8		
30.2		
31.2		
31.7		
32.1		
32.6		
33		
33.5		
34.1		
34.5		
35		
35.5		
35.9		
Limos no remoldeados	36.6	
	36.9	
	37.5	



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

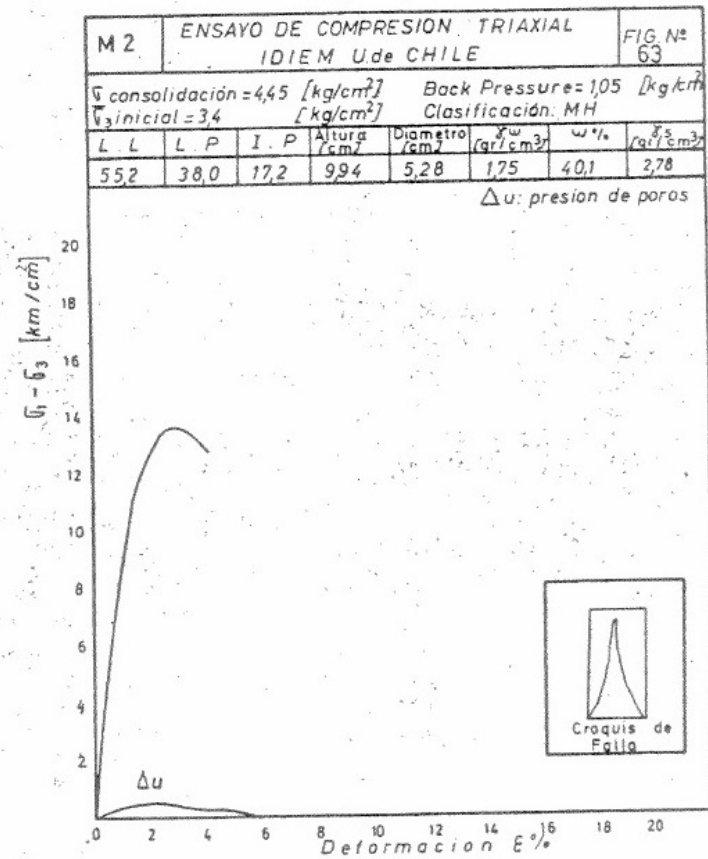
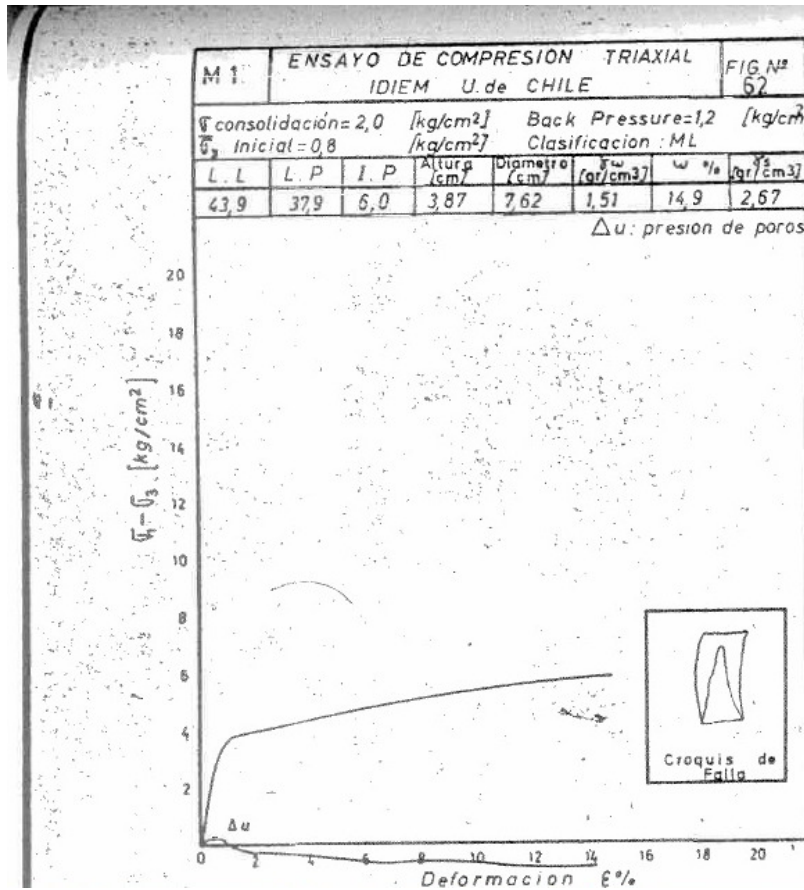
PROPIEDADES INDICE MUESTRAS SUPERFICIALES (Modificado de Ariztía y Vicuña (1968))

Muestra N°	LL	LP	IP	Clasificación USCS	Indice de consistencia	w (%)	γ_w (g/cm ³)	Gs (g/cm ³)	Relación de vacíos	Saturación (%)	σ_c (kg/cm ²)
1	43.9	37.9	6.0	ML	4.8	14.9	1.51	2.67	1.03	38.56	2.00
2	55.2	38.0	17.2	MH	0.9	40.1	1.75	2.78	1.23	90.96	4.45
3	32.6	25.0	7.6	ML	0.0	32.3	1.87	2.75	0.95	93.94	4.45
4	39.0	27.8	11.2	ML	0.8	30.4	1.76	2.78	1.06	79.75	2.80
5	43.4	34.8	8.6	ML	0.0	48.9	1.78	2.59	1.17	108.57	4.45
6	54.7	36.1	18.6	MH	1.2	33.0	1.70	2.59	1.03	83.28	6.00
7	45.2	35.1	10.1	ML	0.7	38.5	1.79	2.83	1.19	91.58	3.00
8	45.2	35.1	10.1	ML	0.7	38.5	1.62	2.78	1.38	77.74	5.00
9	56.2						1.76	2.78			5.00
10	53.7	36.0	17.7	MH	1.2	33.0	1.70	2.63	1.06	82.06	2.50
11	54.7	36.1	18.6	MH	1.2	31.9	1.69	2.73	1.13	77.02	2.50
12	54.7	36.1	18.6	MH	1.2	31.9	1.69	2.73	1.13	77.02	1.00

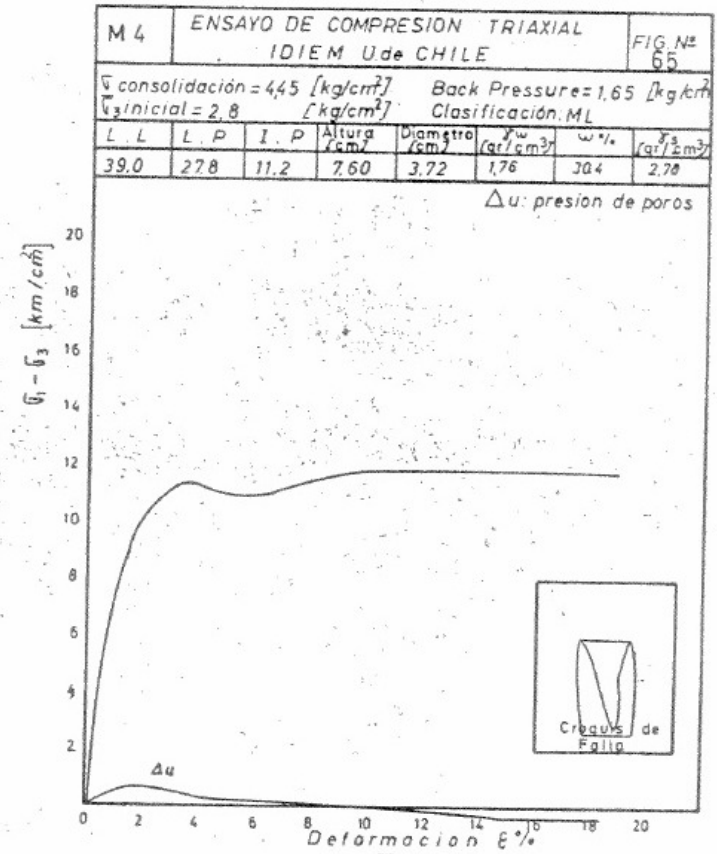
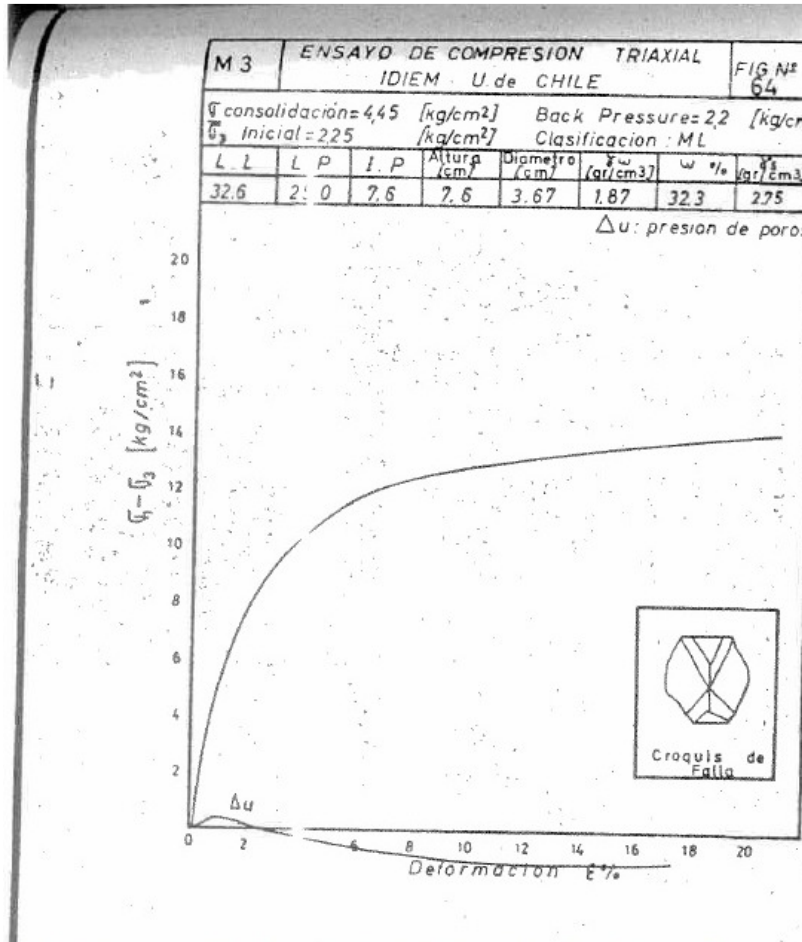
Color	Muestra	c' (kg/cm ²)	ϕ' (°)	
	ML	0.1	40.5	Ruptura ductil Ruptura frágil
	MH	0.3	39.8	
	MH	0.2	41.2	

INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

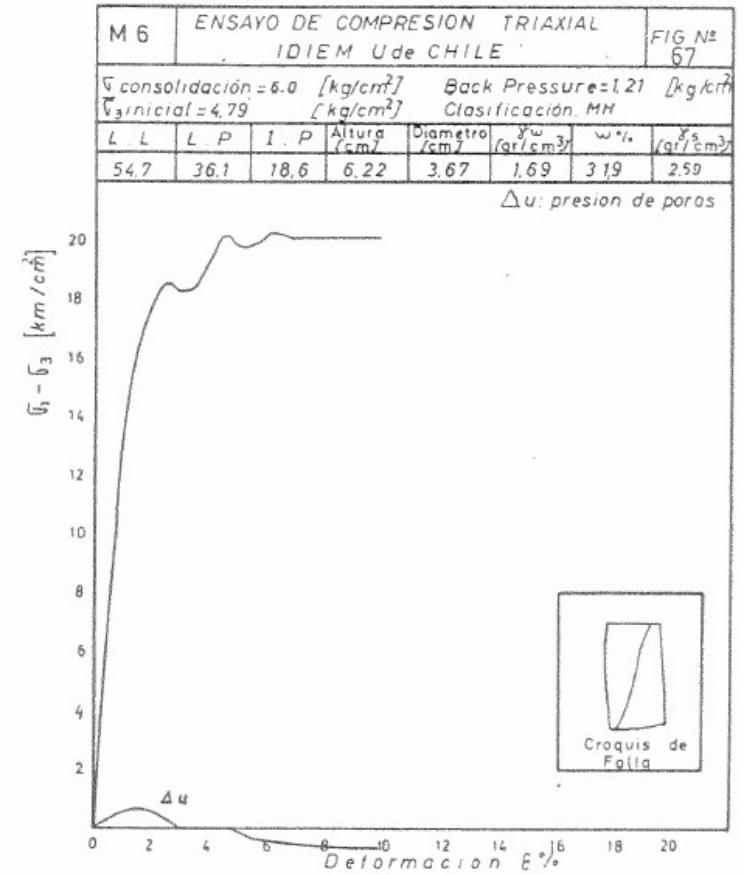
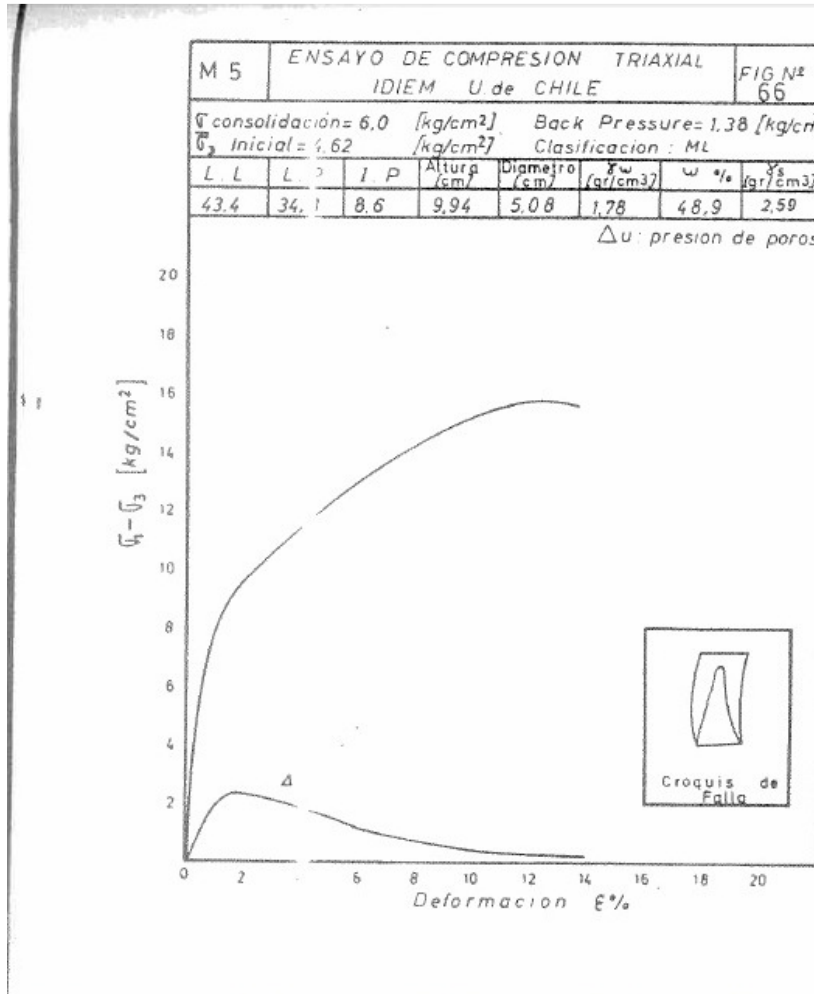
ENSAYOS TRIAXIALES



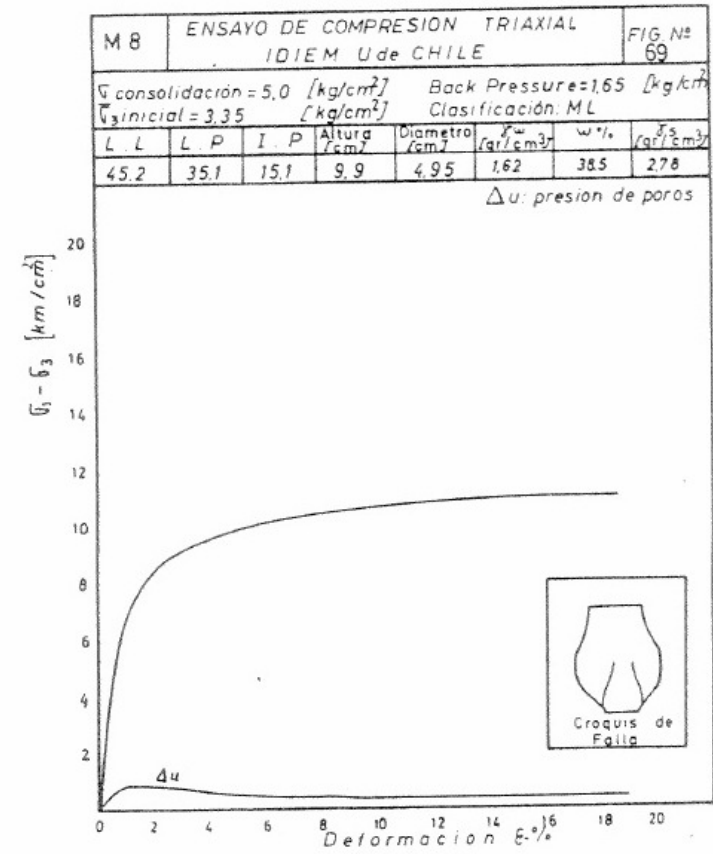
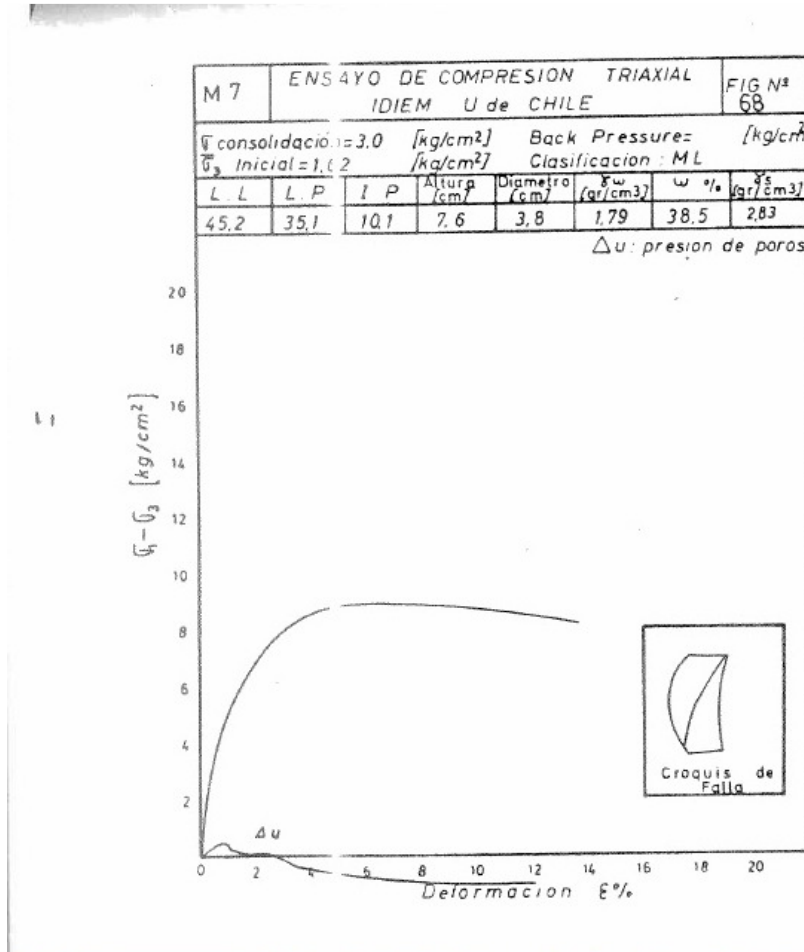
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS



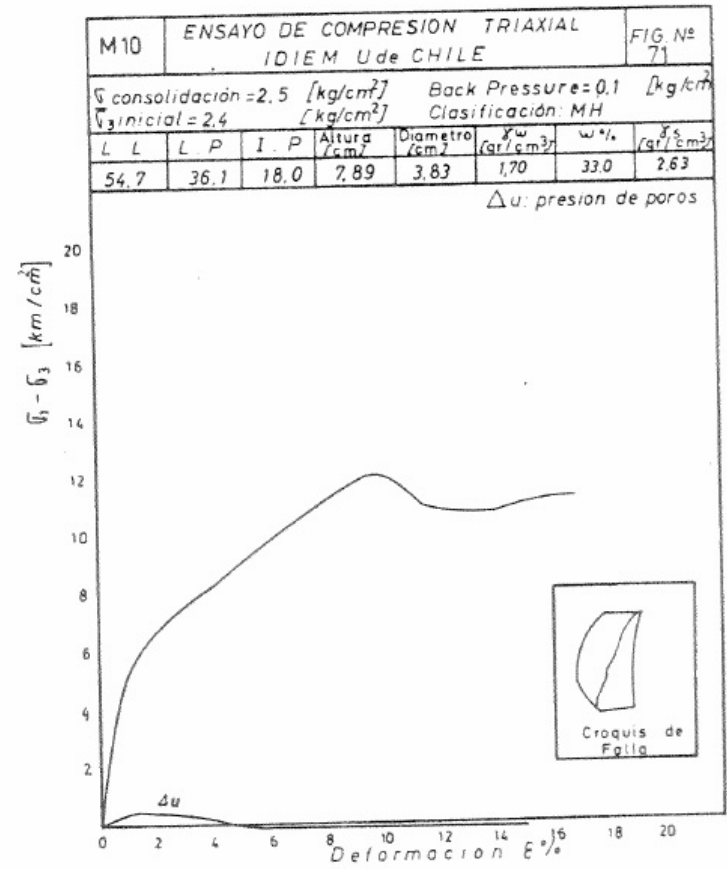
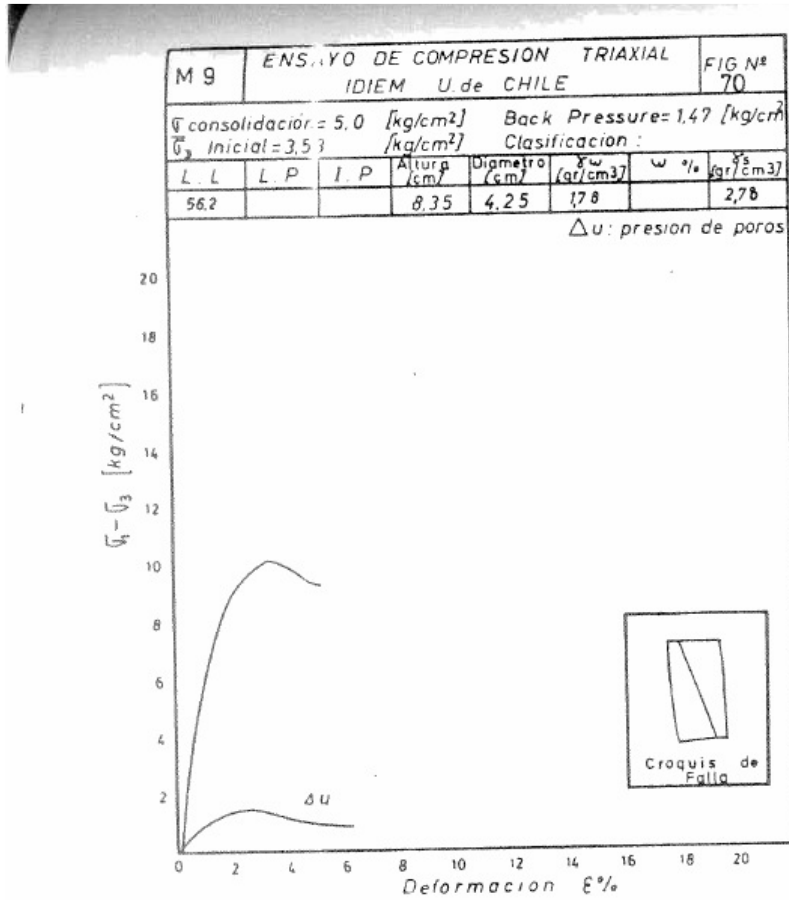
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS



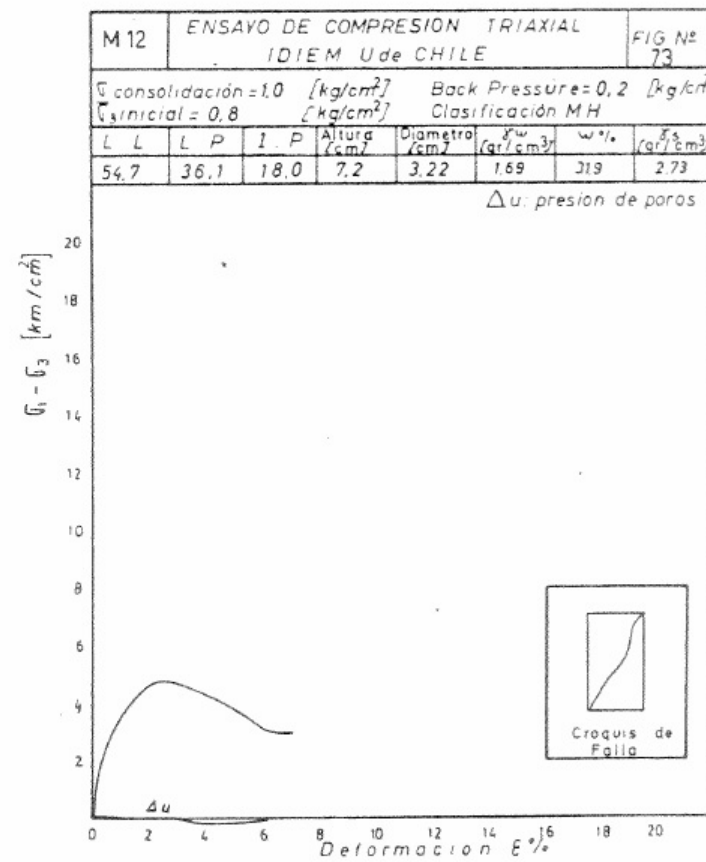
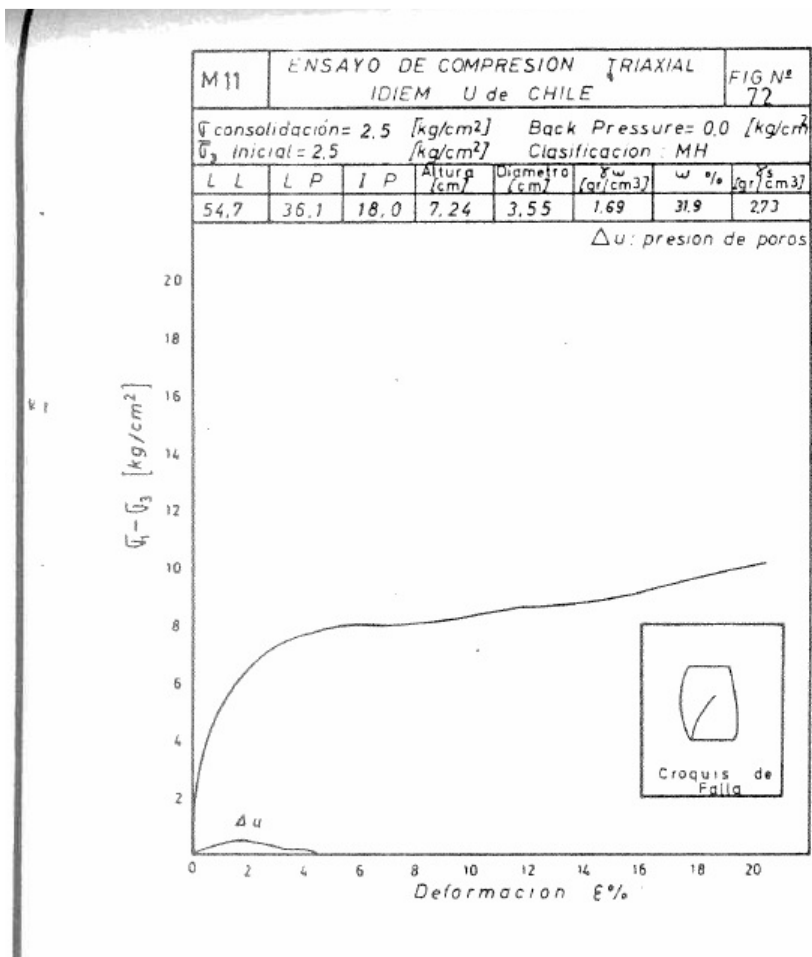
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS



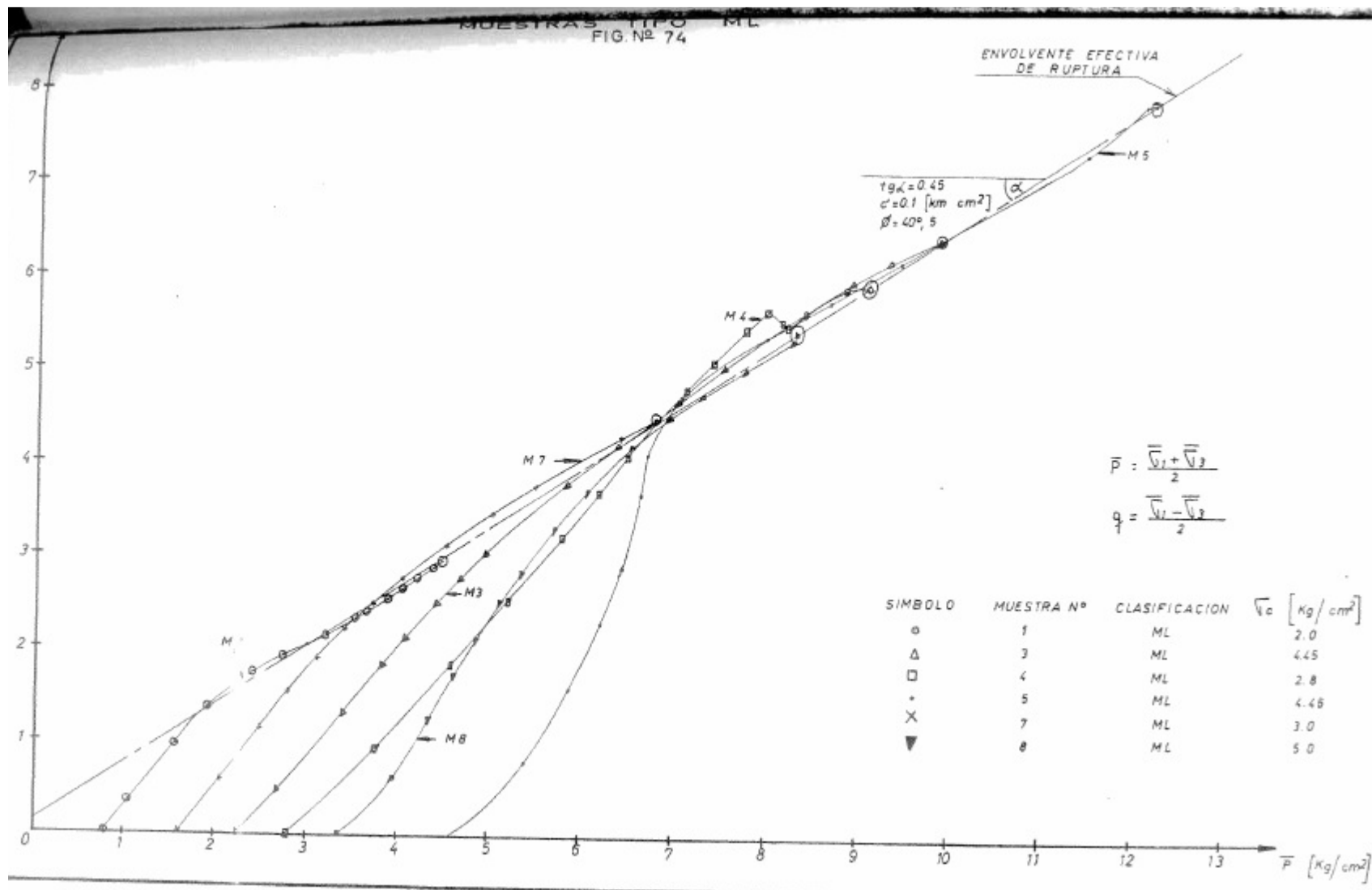
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS



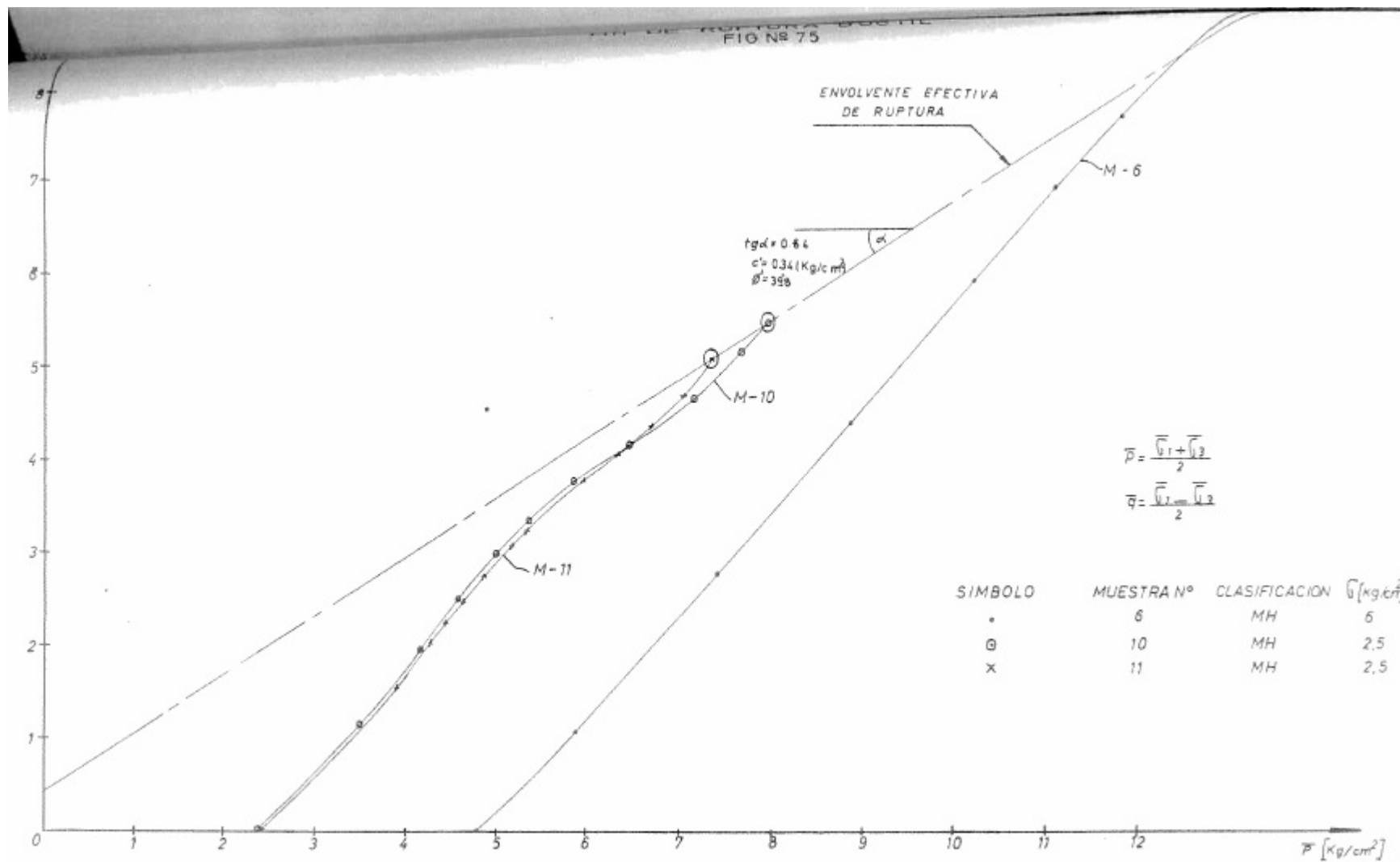
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS



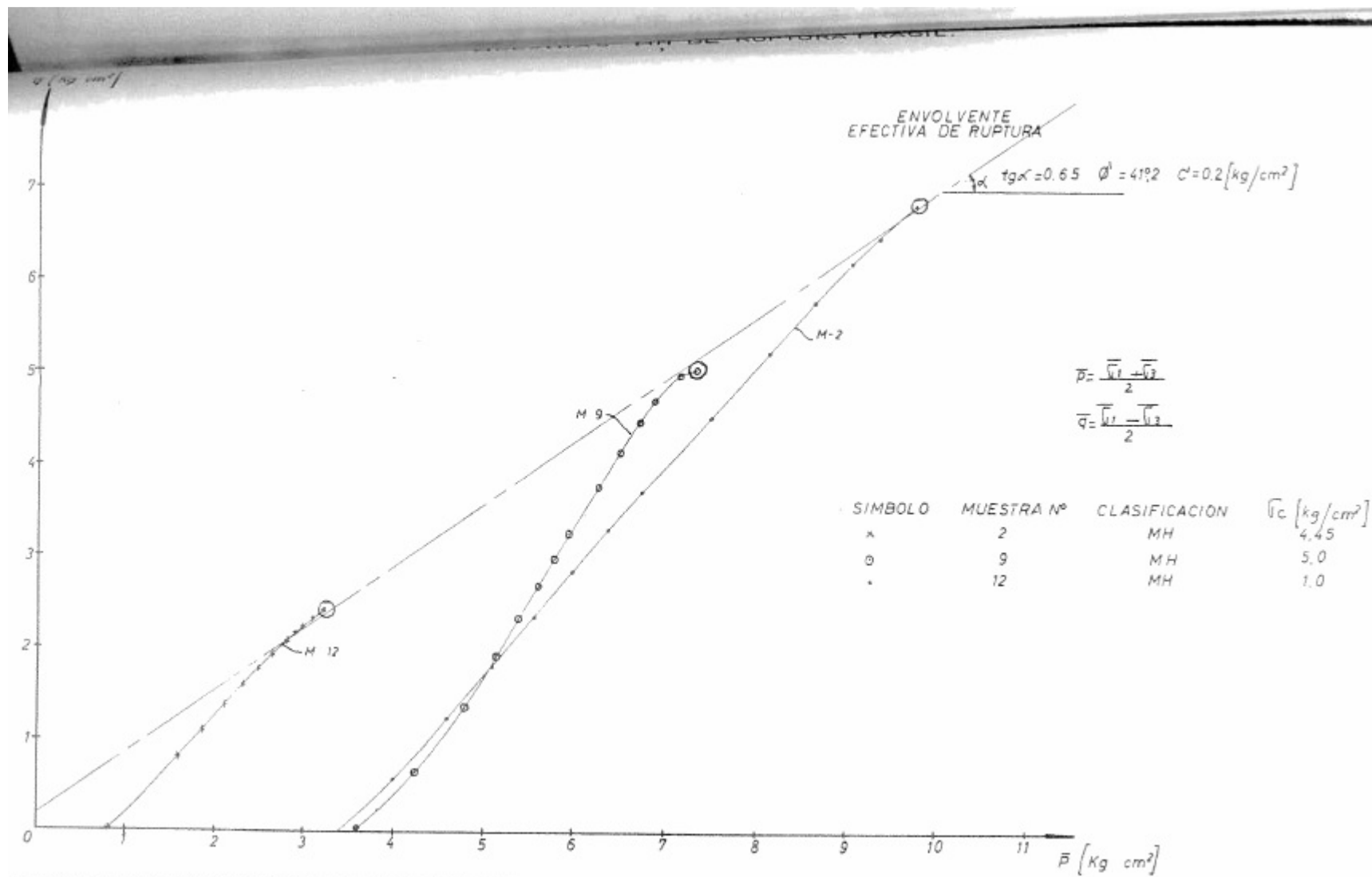
INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS



INFLUENCIA DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE FLUJO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LADERAS

