

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido	Pág.
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	3
2.1 Definición del problema.....	3
2.1.1 Importancia del problema.....	3
2.1.2 Evidencias en Chile.....	4
2.1.3 Licuación reiterada.....	6
2.2 Amenaza sísmica.....	7
2.2.1 Tipos de sismos en Chile.....	7
2.3 Ondas sísmicas	9
2.3.1 Ondas internas	9
2.3.2 Ondas externas o superficiales	10
2.4 Riesgo sísmico	11
2.5 Fenómeno de amplificación sísmica	12
2.6 Efecto de sitio.....	15
2.7 Fenómeno de licuación.....	15
2.7.1 Factores que determinan el fenómeno.....	16
2.7.2 Suelos susceptibles a la licuación.....	17
2.8 Comportamiento del suelo frente a corte cíclico.....	17
2.9 Evaluación del potencial de licuación	18
2.9.1 Solicitación cíclica (Cyclic stress ratio, CSR).....	18
2.9.2 Resistencia cíclica (Cyclic resistance ratio, CRR)	19

2.9.3 Factor de seguridad (F.S)	21
2.10 Mecanismos de fallas	21
2.10.1 Falla por flujo	21
2.10.2 Movilidad cíclica	22
2.10.3 Redistribución de las presiones de poros en el suelo	23
2.11 Fallas en el terreno	23
2.11.1 Fallas de flujo y deslizamientos	23
2.11.2 Desplazamientos laterales	24
2.11.3 Oscilaciones del terreno	25
2.11.4 Pérdida de la capacidad de soporte	26
2.11.5 Asentamientos y volcanes de arena	26
2.11.6 Aumento de la presión lateral sobre estructuras de contención	27
CAPÍTULO III: MÉTODOS	28
3.1 Método seleccionado	28
3.2 Método de elementos finitos	28
3.3 Estado del arte	30
3.3.1 Método de equilibrio límite	30
3.3.2 Método de diferencias finitas	30
3.4. Modelos constitutivos de elementos finitos	31
3.4.1 Elástico	31
3.4.2 Mohr Coulomb	32
3.4.3 Mohr Coulomb modificado	33
3.4.4 Hardening Soil	34
3.4.5 UBCSAND	35
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	39
4.1 Selección y descripción general del puente de estudio	39
4.2 Caracterización geológica	39

4.3 Caracterización geotécnica.....	40
4.4 Descripción estructural del puente de estudio.....	40
4.5 Determinación de la vulnerabilidad del suelo frente al fenómeno de licuación.....	40
4.6 Análisis del comportamiento de la tipología de fundación.....	40
4.7 Estudio sísmico.....	41
4.8 Modelación.....	41
CAPÍTULO V: DESARROLLO Y RESULTADOS.....	42
5.1 Descripción general del puente de estudio.....	42
5.2 Estudio geológico.....	44
5.3 Caracterización geotécnica.....	46
5.3.1 Exploración geotécnica.....	46
5.3.2 Perfil estratigráfico.....	48
5.3.3 Propiedades del material.....	49
5.4 Descripción estructural puente de estudio.....	55
5.5 Determinación de la vulnerabilidad del suelo frente al fenómeno de licuación.....	59
5.6 Análisis del comportamiento de la tipología de fundación.....	60
5.6.1 Fundamento de la elección de tipología.....	60
5.6.2 Capacidad de soporte de los pilotes.....	61
5.6.3 Desplazamiento lateral de pilotes.....	63
5.6.4 Asentamientos.....	64
5.7 Estudio sísmico.....	65
5.7.1 Sismo de análisis.....	65
5.7.2 Registros terremoto 27/F estación UTSM.....	65
5.7.3 Análisis de amplificación dinámica en 1D.....	66
5.7.4 Amplificación sísmica de los estratos.....	68
5.8 Modelación bidimensional.....	71
5.8.1 Modelos.....	71

5.8.2 Condición de campo libre y tamaño de elementos finitos.....	72
5.8.3 Modelos constitutivos	73
5.8.4 Condición de frontera de resortes.....	76
5.8.5 Condición de frontera de bordes absorbentes.....	76
5.8.6 Determinación del periodo predominante	77
5.8.7 Análisis dinámico Tiempo – Historia.....	79
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	117
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES	132
REFERENCIAS	135
ANEXOS	138

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Contenido	Pág.
Ilustración 1: Daños en viviendas terremoto del año 1960	4
Ilustración 2: Daños en puente Juan Pablo II.....	5
Ilustración 3: Daños puente Llacolén.....	5
Ilustración 4: Bahía de Coronel a) Puerto comercial y b) Sifón industrial	6
Ilustración 5: Puente Lo Gallardo terremoto del año 1985	6
Ilustración 6: Tipos de sismos en Chile.....	8
Ilustración 7: Origen y propagación de las ondas sísmicas a través del suelo	9
Ilustración 8: Propagación de ondas de compresión o primarias	10
Ilustración 9: Propagación de ondas de corte o secundarias	10
Ilustración 10: Propagación de ondas Rayleigh	11
Ilustración 11: Propagación de ondas Love	11
Ilustración 12: Fases de prevención del riesgo sísmico	12
Ilustración 13: Recorrido de la onda en función de las características de cada estrato.....	13
Ilustración 14: Ruta de las ondas sísmicas	13
Ilustración 15: Factores relevantes para la amplificación sísmica	14
Ilustración 16: Ejemplificación del efecto de sitio.....	15
Ilustración 17: Fenómeno de licuación en suelos con presencia de arena saturada	16
Ilustración 18: Comportamiento del suelo frente a la aplicación de cargas cíclicas	18
Ilustración 19: Correlación entre resistencia cíclica (CRR) y Número de golpes.....	20
Ilustración 20: Falla por flujo en Presa San Fernando. California, Estados Unidos.	22
Ilustración 21: Colapso de estructura por movilidad cíclica, terremoto Niigata año 1964	22
Ilustración 22: Asentamiento de vivienda por movilidad cíclica terremoto de México 2017.....	23
Ilustración 23: Diagrama de la falla de flujo causada por el fenómeno de licuación.....	24
Ilustración 24: Falla por desplazamiento lateral puente Showa, Terremoto Niigata en el año 1964	25
Ilustración 25: Desplazamiento lateral registrado durante el terremoto de Chiloé en el año 2017 ...	25
Ilustración 26: Oscilación del suelo causada por el evento de licuación	26
Ilustración 27: Generación de volcanes de arenas.....	26
Ilustración 28: Ejemplificación de modelo geotécnico mediante método de elementos finitos.....	28
Ilustración 29: Comportamiento elástico lineal de la deformación en función de la tensión.....	31
Ilustración 30: Comportamiento elastoplástico del modelo Mohr Coulomb	32
Ilustración 31: Superficie de fluencia del modelo Mohr Coulomb	33

Ilustración 32: Superficie de fluencia modelo Hardening Soil	34
Ilustración 33: Comportamiento del modelo Hardening Soil.....	35
Ilustración 34: Análisis de la inducción de una expansión o dilatación plástica.....	36
Ilustración 35: Gráfica de la deformación plástica de corte máxima en función del esfuerzo.....	37
Ilustración 36: Gráfica del modelo UBCSAND y la representación de los resultados calculados para incremento de la presión de poros.....	38
Ilustración 37: Ubicación del puente Llavería dentro de la sexta región.	42
Ilustración 38: Ubicación del puente Llavería	43
Ilustración 39: Estructura del puente Llavería antiguo	43
Ilustración 40: Estructura del puente Llavería nuevo.....	44
Ilustración 41: Detalle del mapa geológico de la zona de estudio	45
Ilustración 42: Detalle de zonificación de acuíferos de la sexta región	45
Ilustración 43: Perfil longitudinal del valle del estero Alhué.....	46
Ilustración 44: Distribución en planta de la exploración del suelo	47
Ilustración 45: Estratigrafía del terreno.....	48
Ilustración 46: Detalle de la estructura del puente Llavería.....	56
Ilustración 47: Detalle de la estructura del tablero.....	57
Ilustración 48: Detalle de la estructura de las vigas	57
Ilustración 49: Detalle en elevación de la estructura de los estribos	58
Ilustración 50: Detalle en planta de los estribos.....	58
Ilustración 51: Tipo de falla de cada fundación, propuesta de Vesic (1973), adaptado de Braja Das (Das, 1999).....	60
Ilustración 52: Porcentaje de participación en la resistencia última.....	62
Ilustración 53: Respuesta lateral de la fundación para el estribo suroeste	63
Ilustración 54: Respuesta lateral de la fundación para el estribo noreste.....	64
Ilustración 55: Registros de aceleraciones de la estación UTFSM en el terremoto del año 2010.....	65
Ilustración 56: Columnas de suelo para el análisis unidimensional en Deepsoil	67
Ilustración 57: Registro análisis unidimensional de aceleración de la columna 1	68
Ilustración 58: Registro análisis unidimensional de aceleración de la columna 2	70
Ilustración 59: Modelo 1- Sección transversal estribo suroeste	71
Ilustración 60: Modelo 2- Sección transversal estribo noreste.....	72
Ilustración 61: Modelo 3- Sección longitudinal del puente Llavería	72
Ilustración 62: Tipos de modelos constitutivos	74
Ilustración 63: Representación gráfica de la condición de resorte de superficie.....	76

Ilustración 64: Ejemplificación de la condición de bordes absorbentes.....	77
Ilustración 65: Representación gráfica del software para los bordes absorbentes	77
Ilustración 66: Registro de aceleración transversal del terremoto del 27-F.....	79
Ilustración 67: Diagrama de vulnerabilidad al fenómeno de licuación para el modelo 1	81
Ilustración 68: Diagrama de vulnerabilidad al fenómeno de licuación para el modelo 2	81
Ilustración 69: Diagrama de vulnerabilidad al fenómeno de licuación para el modelo 3	82
Ilustración 70: Vulnerabilidad al fenómeno de licuación sección transversal del estribo suroeste...	82
Ilustración 71: Vulnerabilidad al fenómeno de licuación sección transversal del estribo noreste	83
Ilustración 72: Vulnerabilidad al fenómeno de licuación para la sección longitudinal.....	83
Ilustración 73: Vulnerabilidad al fenómeno de licuación sección transversal de la zona de fundación del estribo suroeste	84
Ilustración 74: Vulnerabilidad al fenómeno de licuación sección transversal de la zona de fundación del estribo noreste	85
Ilustración 75: Vulnerabilidad al fenómeno de licuación para la sección longitudinal de la zona de fundación de ambos estribos	85
Ilustración 76: Diagrama de aceleración transversal para el modelo 1	86
Ilustración 77: Diagrama de aceleración transversal para el modelo 2	86
Ilustración 78: Diagrama de aceleración transversal para el modelo 3	86
Ilustración 79: Aceleración transversal por estrato de la sección del estribo suroeste. Modelo 1	87
Ilustración 80: Aceleración transversal por estrato de la sección del estribo noreste. Modelo 2	87
Ilustración 81: Aceleración transversal por estrato de la sección del estribo suroeste. Modelo 3	88
Ilustración 82: Aceleración transversal por estrato de la sección del estribo noreste. Modelo 3	88
Ilustración 83: Diagrama de aceleración longitudinal para el modelo 1	92
Ilustración 84: Diagrama de aceleración longitudinal para el modelo 2	92
Ilustración 85: Diagrama de aceleración longitudinal para el modelo 3	92
Ilustración 86: Aceleración longitudinal por estrato de la sección del estribo suroeste. Modelo 1 ..	93
Ilustración 87: Aceleración longitudinal por estrato de la sección del estribo noreste. Modelo 2....	93
Ilustración 88: Aceleración longitudinal por estrato de la sección del estribo suroeste. Modelo 3 ..	94
Ilustración 89: Aceleración longitudinal por estrato de la sección del estribo noreste. Modelo 3	94
Ilustración 90: Diagrama de desplazamientos en dirección transversal del modelo 1	98
Ilustración 91: Diagrama de desplazamientos en dirección transversal del modelo 2	98
Ilustración 92: Diagrama de desplazamientos en dirección transversal del modelo 3	98
Ilustración 93: Desplazamientos transversales de la sección estribo suroeste. Modelo 1	99
Ilustración 94: Desplazamientos transversales de la sección estribo noreste. Modelo 2	100

Ilustración 95: Desplazamientos transversales de la sección estribo suroeste. Modelo 3	100
Ilustración 96: Desplazamientos transversales de la sección estribo noreste. Modelo 3	101
Ilustración 97: Desplazamientos transversales máximos fundación estribo suroeste. Modelo 1	101
Ilustración 98: Desplazamientos transversales en el tiempo fundación estribo suroeste. Modelo 1	102
Ilustración 99: Desplazamientos transversales máximos fundación estribo noreste. Modelo 2	103
Ilustración 100: Desplazamientos transversales en el tiempo fundación estribo noreste. Modelo 2	103
Ilustración 101: Desplazamientos transversales máximos fundación del puente. Modelo 3	104
Ilustración 102: Desplazamientos transversales en el tiempo fundación del puente. Modelo 3	104
Ilustración 103: Diagrama de desplazamientos en dirección longitudinal del modelo 1	105
Ilustración 104: Diagrama de desplazamientos en dirección longitudinal del modelo 2	105
Ilustración 105: Diagrama de desplazamientos en dirección longitudinal del modelo 3	105
Ilustración 106: Desplazamientos longitudinales de la sección del estribo suroeste. Modelo 1	106
Ilustración 107: Desplazamientos longitudinales de la sección del estribo noreste. Modelo 2	107
Ilustración 108: Desplazamientos longitudinales de la sección del estribo suroeste. Modelo 3	108
Ilustración 109: Desplazamientos longitudinales de la sección del estribo noreste. Modelo 3	108
Ilustración 110: Desplazamientos longitudinales máximos fundación estribo suroeste. Modelo 1	109
Ilustración 111: Desplazamientos longitudinales en el tiempo fundación estribo suroeste. Modelo 1	109
Ilustración 112: Desplazamientos longitudinales máximos fundación estribo noreste. Modelo 2	110
Ilustración 113: Desplazamientos longitudinales en el tiempo fundación estribo noreste. Modelo 2	110
Ilustración 114: Desplazamientos longitudinales máximos fundación del puente. Modelo 3	111
Ilustración 115: Desplazamientos longitudinales en el tiempo fundación del puente. Modelo 3	111
Ilustración 116: Esfuerzo axial por pilote de la sección transversal del estribo suroeste	112
Ilustración 117: Esfuerzo axial por pilote de la sección transversal del estribo noreste	112
Ilustración 118: Esfuerzo axial por pilotes de la sección longitudinal del puente	113
Ilustración 119: Esfuerzo cortante por pilote de la sección transversal del estribo suroeste	114
Ilustración 120: Esfuerzo cortante por pilote de la sección transversal del estribo noreste	114
Ilustración 121: Esfuerzo cortante por pilote de la sección longitudinal del puente	115
Ilustración 122: Momento flector por pilote de la sección transversal del estribo suroeste	115
Ilustración 123: Momento flector por pilote de la sección transversal del estribo noreste	116
Ilustración 124: Momento flector por pilote de la sección longitudinal del puente	116
Ilustración 125: Comparación de los resultados de vulnerabilidad del fenómeno de licuación de los modelos bidimensional 1 y 3 para el estribo suroeste	119

Ilustración 126: Comparación de los resultados de vulnerabilidad del fenómeno de licuación de los modelos bidimensional 2 y 3 para el estribo noreste.....	119
Ilustración 127: Comparación de los resultados de vulnerabilidad del fenómeno de licuación de los modelos bidimensionales para la zona de fundación	120
Ilustración 128: Espectro de pseudo aceleración transversal respecto al periodo para los estratos de la zona del estribo suroeste	123
Ilustración 129: Espectro de pseudo aceleración transversal respecto al periodo para los estratos de la zona del estribo noreste.....	123
Ilustración 130: Espectro de pseudo aceleración longitudinal respecto al periodo para los estratos de la zona del estribo suroeste.....	125
Ilustración 131: Espectro de pseudo aceleración longitudinal respecto al periodo para los estratos de la zona del estribo noreste	125
Ilustración 132: Análisis de la amplificación sísmica en base a los registros del PSA	126

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Pág.
Tabla 1: Registros del terremoto del Maule del año 2010	66
Tabla 2: Propiedades de las capas de la columna 1. Estribo suroeste	67
Tabla 3: Propiedades de las capas de la columna de suelo 2. Estribo noreste.....	67
Tabla 4: Propiedades por estrato del modelo 1	75
Tabla 5: Propiedades por estrato del modelo 2	75
Tabla 6: Datos obtenidos del análisis “Eigenvalue” para el modelo 1	78
Tabla 7: Datos obtenidos del análisis “Eigenvalue” para el modelo 2.....	78
Tabla 8: Datos obtenidos del análisis “Eigenvalue” para el modelo 3.....	78
Tabla 9: Datos dinámicos del caso de modelación Tiempo-Historia no lineal	80
Tabla 10: Aceleraciones máximas obtenidas del análisis bidimensional Tiempo-Historia no lineal	117
Tabla 11: Espectro de pseudo aceleración transversal máximo por estrato zona estribo suroeste..	121
Tabla 12: Espectro de pseudo aceleración transversal máximo por estrato zona estribo noreste ...	121
Tabla 13: Espectro de pseudo aceleración longitudinal máxima por estrato zona estribo suroeste según cada modelo	124
Tabla 14: Espectro de pseudo aceleración longitudinal máxima por estrato zona estribo noreste según cada modelo	124
Tabla 15: Desplazamientos transversales máximos del estribo suroeste	127
Tabla 16: Desplazamientos transversales máximos del estribo noreste	128
Tabla 17: Desplazamientos transversales máximos de los pilotes de la fundación de cada estribo	128
Tabla 18: Desplazamientos transversales máximos de los pilotes sección longitudinal del puente	129
Tabla 19: Asentamientos máximos del estribo suroeste	129
Tabla 20: Asentamientos máximos del estribo noreste	129
Tabla 21: Asentamientos máximos de los pilotes de la fundación de cada estribo.....	130
Tabla 22: Asentamientos máximos de los pilotes para la sección longitudinal del puente.....	130

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Contenido	Pág.
Gráfico 1: Datos del ensayo de penetración estándar.....	47
Gráfico 2: Densidad relativa v/s Profundidad.	50
Gráfico 3: Ángulo de fricción v/s Profundidad.	51
Gráfico 4: Resistencia al corte No-Drenado v/s Profundidad.	52
Gráfico 5: Cohesión v/s Profundidad.	53
Gráfico 6: Velocidad de onda de corte v/s profundidad.....	54
Gráfico 7: Módulo de elasticidad v/s Profundidad.....	55
Gráfico 8: Factor de seguridad v/s Profundidad para la zona de fundación.....	59
Gráfico 9: Resistencia de punta del pilote v/s Tipo de metodología.....	62
Gráfico 10: Espectro de pseudo aceleración por estrato de la columna 1	69
Gráfico 11: Espectro de pseudo aceleración por estrato de la columna 2	70
Gráfico 12: Espectro de pseudo aceleración transversal sección del estribo suroeste. Modelo 1	89
Gráfico 13: Espectro de pseudo aceleración transversal sección del estribo noreste. Modelo 2	90
Gráfico 14: Espectro de pseudo aceleración transversal sección del estribo suroeste. Modelo 3	91
Gráfico 15: Espectro de pseudo aceleración transversal sección del estribo noreste. Modelo 3	91
Gráfico 16: Espectro de pseudo aceleración longitudinal sección del estribo suroeste. Modelo 1 ...	95
Gráfico 17: Espectro de pseudo aceleración longitudinal sección del estribo noreste. Modelo 2.....	96
Gráfico 18: Espectro de pseudo aceleración longitudinal sección del estribo suroeste. Modelo 3 ...	96
Gráfico 19: Espectro de pseudo aceleración longitudinal sección del estribo noreste. Modelo 3.....	97
Gráfico 20: Vulnerabilidad de licuación en función de las aceleraciones obtenidas de las modelaciones.....	118