

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 EXPOSICIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.3 METODOLOGÍA Y LIMITACIONES.....	6
II. ANTECEDENTES	12
2.1 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SUELO	12
2.2 CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA AL CORTE DE UN SUELO	14
2.2.1 ENSAYO DE CORTE DIRECTO	14
2.3 REMOCIONES EN MASA GENERADAS POR TERREMOTOS.....	21
III. ANÁLISIS REMOCIONES EN MASA GENERADAS POR TERREMOTO DEL 2010 EN LA PENÍNSULA DE ARAUCO	29
3.1 ANTECEDENTES	29
3.1.1 GENERALIDADES	29
3.1.2 UBICACIÓN Y ACCESO	29
3.1.3 MARCO TECTÓNICO	30
3.1.4 MARCO SISMOLÓGICO.....	34
3.1.5 GEOMORFOLOGÍA	39
3.1.6 MARCO GEOLÓGICO	43
3.2 MAPEO DE REMOCIONES EN MASA EN LA PENÍNSULA DE ARAUCO....	47
3.2.1 GENERALIDADES	47
3.2.2 DESLIZAMIENTOS DE SUELO	54
3.2.3 DESLIZAMIENTOS DE ROCA.....	57
3.2.4 CAÍDAS DE ROCA.....	61

3.2.5 DESLIZAMIENTOS MIXTOS.....	62
3.2.6 AVALANCHAS DE ROCA	63
IV. RESULTADOS GEOTÉCNICOS.....	68
4.1 ARAUCO.....	68
4.1.1 GENERALIDADES	68
4.1.2 PARÁMETROS DE RESISTENCIA.....	70
4.1.3 ENSAYOS DE CORTE CÍCLICO	78
4.1.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	86
4.2 AYSÉN.....	89
4.2.1 GENERALIDADES	89
4.2.2 RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO.....	91
4.3 LAS MELOSAS	97
4.3.1 GENERALIDADES	97
4.3.2 RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO.....	99
V. DISCUSIÓN.....	105
5.1 INVENTARIO DE REMOCIONES EN LA PENÍNSULA DE ARAUCO.....	105
5.2 ENSAYOS GEOTÉCNICOS	108
5.2.1 ARAUCO	108
5.2.2 AYSÉN Y LAS MELOSAS	116
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
6.1 CONCLUSIONES	120
6.2 RECOMENDACIONES	122
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	123
VIII. ANEXOS.....	132
A. GRÁFICOS STRESS-STRAIN (ARAUCO).....	132
B. UBICACIÓN RM INVENTARIADAS EN LA PENÍNSULA DE ARAUCO.....	134
C. ANTECEDENTES REMOCIONES EN MASA POR TERREMOTOS DE AYSÉN Y LAS MELOSAS.....	137
CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS: AYSÉN.....	137
DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS REMOCIONES EN MASA	138

CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS: LAS MELOSAS.....	143
ESTUDIO DE DAÑOS Y REMOCIONES EN MASA COSÍSMICAS	143
D. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	149
E. INFORME IDIEM	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Embalaje de muestras enviadas al laboratorio de Remociones en masa de la Universidad de Durham (UK), para la realización de los ensayos de corte directo monotónicos y dinámicos.	10
Figura 2: Gráficos Stress vs Strain para curvas ideales de dos ensayos distintos.	13
Figura 3: Izquierda: máquina de corte directo monotónico. Derecha: máquina de corte directo dinámico.	15
Figura 4: Ilustración de fenómeno de contracción y dilatación en granos con formas de discos en condiciones sueltas y densas. (Sáez, 2010)	16
Figura 5: Composición interna de la celda de aplicación de los ensayos dinámicos, DynBPS sus siglas en inglés (“Dynamic Back-Pressured Shearbox”). (Brain et al., 2015)	18
Figura 6: Arriba: Ejemplo de fases dinámicas con distintas combinaciones de stress de cizalle y normal. (Brain et al., 2015). Abajo izq: Ensayo dinámico en muestra de la Ignimbrita de Pudahuel. Der: Comparación de ciclos dinámicos con respecto a la envolvente de ruptura de muestras de la Ignimbrita de Pudahuel. (Sepúlveda et al., 2016)	20
Figura 7: Relación entre Magnitud de 40 terremotos históricos versus el área afectada por las RM generadas. Modificado de Keefer, 2004.	22
Figura 8: RM ocurridas con el terremoto de Wenchuan. A: Deslizamiento de Tangjiashan que generó un represamiento. B: Deslizamiento superficial en una arenisca sobre lutita. C: Fallamiento en cimas de cerros. D: Caídas de roca. Modificado de Chigira et al., 2010.	24
Figura 9: Deslizamiento de Hattian en terremoto de Kashmir, Pakistán. A: Imagen “Quickbird” de un evento previo para reconocer la naturaleza de la ruptura. B: Zona de ruptura. C: Superficie de los depósitos con formación de hummocks, el círculo negro encierra a dos personas con motivos de escala. Modificado de Owen et al., 2008.	26
Figura 10: Ubicación zona de estudio (cuadrángulo rojo) y principales vías de acceso. Modificado de mapa base del software ARCGIS 10 de ESRI y software Google Earth.	30

Figura 11: Configuración tectónica y rasgos estructurales más importantes de la Península de Arauco y cercanías. Modificado de Geersen et al., 2011	32
Figura 12: Segmentos morfotectónicos, modificado de Geersen et al., (2011). Segmento Concepción Norte (negro), Concepción Sur (Rojo), Nahuelbuta (Azul) y Toltén (Naranja).	33
Figura 13: Epicentro (color rojo). Réplicas con magnitud >4.7 (color violeta las del primer día y azules las posteriores) y zona de ruptura asociada al terremoto del día 27 de febrero de 2010 en la zona centro-sur de Chile. (Barrientos, 2010).	34
Figura 14: Segmentos de ruptura asociados al terremoto del 27 de febrero del 2010. Modificado de Quezada et al., (2012).	36
Figura 15: Izquierda: es posible apreciar en color blanco las algas coralinas utilizadas como marcador para la medición de alzamiento o subsidencia. En la imagen de la derecha, la zona de Punta Lavapié en la Península de Arauco, afectada por alzamiento. Fotos de Sergio Barrientos, Servicio Sismológico, 2010.	38
Figura 16: Desplazamientos horizontales y verticales en la zona entre Constitución y Concepción. Modificado de Vigny et al., 2011	38
Figura 17: Distribución geomorfológica de la región del Bío Bío. 1- Planicie litoral, 2- Cordillera de Nahuelbuta, 3- Llanura fluvial, 4- Depresión intermedia, 5- Precordillera, 6- Cordillera Andina. Modificado de Baechler et al., (2012).	40
Figura 18: Mapa de pendientes de la zona de estudio.	41
Figura 19: Mapa de orientación de laderas de la zona de estudio.	42
Figura 20: Mapa geológico zona de estudio. Modificado de Henriquez, 2006 y Sernageomin, 2003.	46
Figura 21: Inventario de remociones elaborado en la zona de la Cordillera de la Costa y planicie litoral para el terremoto del 2010. Rectángulo negro demarca área de estudio de este trabajo Modificado de Escobar, 2013.	48
Figura 22: Localización de remociones en masa inventariadas en la Península de Arauco	49
Figura 23: Mapeo de remociones en masa inventariadas en la Península de Arauco. Sector Tubul.	52

Figura 24: Mapeo de remociones en masa inventariadas en la Península de Arauco. Sector Punta Lavapié.	53
Figura 25: Deslizamiento de suelo en camino Llico-Pta Lavapié.	55
Figura 26: Deslizamientos de suelo Caleta Las Peñas. Vista hacia el Sur.	56
Figura 27: Deslizamiento superficial Camino Tubul-Caleta Las Peñas.	57
Figura 28: Deslizamiento superficial Camino Tubul-Caleta Las Peñas.	57
Figura 29: Vista general deslizamientos de caleta Tubul.	58
Figura 30: Deslizamientos de roca en la localidad de Tubul. Arriba: deslizamiento oeste. Abajo: deslizamiento Este.	59
Figura 31: Deslizamientos de roca en Caleta Las Peñas.	60
Figura 32: Deslizamiento de roca en Piuré	61
Figura 33: Caídas de roca a un costado del río Tubul.	62
Figura 34: Caídas de roca en Tubul (Izq), y en el camino de Llico a Pta. Lavapié (Der.).	62
Figura 35: Deslizamiento suelo y roca, al oeste del río Tubul (Izq). Deslizamiento suelo y roca en el camino entre Llico y Pta. Lavapié (Der.).....	63
Figura 36: Avalanchas de roca, imágenes obtenidas desde Google Earth. Izquierda: 2009, derecha:2011	64
Figura 37: Vista Panorámica del deslizamiento Oeste	66
Figura 38: Vista general segundo deslizamiento.....	67
Figura 39: Curvas granulométricas de muestra de roca blanda (Arauco)	69
Figura 40: Preparación muestras Arauco. (a-b): Corte de muestras. (c) Muestras para ensayos dinámicos (d): Muestras para ensayos monotónicos.	71
Figura 41: Gráficos de stress-strain (horizontal) de ensayos monotónicos (a-d) y de deformación volumétrica (axial) normalizada vs strain horizontal. (e-h) para distintas sollicitaciones de carga normal.	74
Figura 42: Envolvente de ruptura para set de datos (Peak) en muestras NPNS (línea continua). El campo gris oscuro corresponde al rango de confianza de los datos.	77
Figura 43: Tipos de fracturas observadas en los experimentos realizados en muestras de Arauco.	78

Figura 44: Esquema de campos de esfuerzos para tres fases dinámicas con la misma amplitud (0.2 kN) usando niveles base de cizalle distintos.	81
Figura 45: Gráficos de stress-strain y cambio volumétrico para ensayo monotónico base y ensayos dinámicos con dos fases. (a) Monotónico con stress normal de 50 kPa. (b) Dinámico 1 (DI). (c) Dinámico 2 (DII). (d) Dinámico 3 (DIII). (e) Dinámico 4 (DIV).....	84
Figura 46: Gráficos de stress-strain y cambio volumétrico para ensayo monotónico base y ensayos dinámicos de una fase. (a) Monotónico con stress normal de 50 kPa. (b) Dinámico 5 (DV). (c) Dinámico 6 (DVI) (d) Dinámico 7 (DVII). (e) Dinámico 8 (DVIII). (f) Dinámico 9 (IX). (g) Dinámico 10 (DX).....	85
Figura 47: Ubicación toma de muestra en Aysén, a un costado del lago Los Palos (marcador rojo). Imagen extraída de Google Earth.....	89
Figura 48: Curvas granulométricas de muestras de suelo (Aysén).....	90
Figura 49: Izq.: Preparación de muestras Aysén para ensayos remoldeados. Der: Muestra post ensayo de corte directo.	90
Figura 50: Envolvente de ruptura ensayos de corte monotónicos Aysén.....	92
Figura 51: Ensayos válidos en gráfico stress-strain a distintas solicitaciones de carga normal.	92
Figura 52: Cambio volumétrico para cada uno de los ensayos.....	93
Figura 53: Cuadro resumen de resultados de ensayos dinámicos en muestras extraídas en Aysén. De izquierda a derecha (arriba test 1 y abajo test 2): 1.- Envolvente de ruptura de ensayos monotónicos junto al campo de esfuerzos dinámicos del test correspondiente. 2.- Gráfico de stress-strain comparando test monotónico y dinámico a 50 kPa. 3.- Cambio volumétrico en el test monotónico en comparación con test dinámico a una carga de 50 kPa.	96
Figura 54: Ubicación material muestreado en valle del río Yeso (Marcador amarillo). Imagen extraída de Google Earth.	98
Figura 55: Curvas granulométricas de muestras de suelo	99
Figura 56: Izq: Bloque recolectado previo al tamizaje. Der: estado del material post ensayo monotónico.	99
Figura 57: Ensayos válidos en gráfico stress-strain a distintas solicitaciones de carga normal.	101

Figura 58: Cambio volumétrico para cada uno de los ensayos.....	102
Figura 59: Cuadro resumen de resultados de ensayos dinámicos en muestras extraídas en deslizamiento Las Cortaderas. De izquierda a derecha (arriba test 1 y abajo test 2): 1.- Envolvente de ruptura de ensayos monotónicos junto al campo de esfuerzos dinámicos del test correspondiente. 2.- Gráfico de stress-strain comparando test monotónico y dinámico a 50 kPa. 3.- Cambio volumétrico en el test monotónico en comparación con test dinámico a una carga de 50 kPa.....	104
Figura 60: Gráficos de stress-strain (izq.) y cambio volumétrico (der.) en detalle. (a-b) Gráficos con dos etapas dinámicas. (c-d) Gráficos de una sola etapa dinámica con una amplitud de 0.2 kN. (e-f) Gráficos de una sola etapa dinámica y con amplitudes de 0.4 y 0.6 kN (azul y rojo respectivamente).....	115

ÍNDICE DE ECUACIONES

II.1	13
------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: PGA medidos durante el terremoto del 27 de febrero del 2010 del Maule. (Boroschek et al., 2012)	36
Tabla 2: PGA medidos durante el terremoto del 27 de febrero del 2010 del Maule. (Barrientos, 2010)	37
Tabla 3: Características generales de las muestras extraídas en Tubul.....	69
Tabla 4: Resumen resultados a ensayos realizados en IDIEM.....	70
Tabla 5: Parámetros ensayos de corte directo monotónico Arauco.....	75
Tabla 6: Parámetros utilizados en fases dinámicas de los ensayos realizados en Universidad de Durham en muestras extraídas de Arauco.....	83
Tabla 7: Resumen de factores de seguridad para análisis preliminares de estabilidad en deslizamiento de roca de Tubul.	87
Tabla 8: Resumen de factores de seguridad para análisis preliminares de estabilidad en deslizamiento de roca de Tubul.	87
Tabla 9: Parámetros ensayos de corte directo Aysén. (V): Válido. (NV): No válido	91

Tabla 10: Parámetros fase dinámica, locación Aysén.....	94
Tabla 11: Parámetros ensayos de corte directo (monotónico) Las Melosas. (V) Válido, (NV) No válido.....	100
Tabla 12: Parámetros fase dinámica, locación Cajón del Maipo.....	102