

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	3
1.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Estructura de la Tesis.....	4
2. Revisión bibliográfica	5
2.1. Estructuras de contención.....	5
2.2. Concepto de suelo reforzado	10
2.3. Tipos de muros mecánicamente estabilizados.....	11
2.4. Fachada	12
2.5. Características del suelo de relleno	13
2.6. Fallas en muros mecánicamente estabilizados.....	16
2.7. Mecanismos de transferencia de esfuerzos en los refuerzos.....	20
2.8. Modo de acción del refuerzo	21
2.9. Fuerza de arranque.....	22
2.10. Estimación de la resistencia al arranque en estructuras de suelo reforzado	23
2.11. Proceso de compactación.....	26
2.12. Obtención de parámetros de resistencia del suelo	27
2.13. Métodos de análisis en muros mecánicamente estabilizados.....	32
3. Métodos Semi – empíricos de diseño	35
3.1. Motivación	35
3.2. Estabilidad Externa (Ejemplo Minnow Creek).....	37
3.2.1 Deslizamiento	40
3.2.2 Volcamiento	40
3.2.3 Falla en la capacidad de Soporte	41
3.3. Estabilidad Interna.....	45
3.3.1 Rotura de refuerzos	45
3.3.2 Arranque de los refuerzos	47
3.4. Metodologías de Diseño.....	50
3.4.1 Coherent Gravity Method.....	50
3.4.2 FHWA Structure Stiffness Method	54
3.4.3 Simplified Method	57

3.4.4	Comparación de metodologías	59
3.4.5	Efecto de la sobrecarga (q)	60
4.	Modelamiento numérico de muros mecánicamente estabilizados	63
4.1	Relaciones Constitutivas	63
4.2	Formulación mediante elementos finitos	66
4.3	Modelamiento numérico de muros mecánicamente estabilizados	68
4.3.1	PLAXIS	69
4.3.2	GTS - NX	74
4.4	Resultados	79
5.	Caso estudio: Muro mecánicamente estabilizado Minnow Creek	87
5.1.	Instrumentación y monitoreo	89
5.2.	Modelamiento Numérico	90
5.3.	Calibración inicial del modelo	96
5.4.	Resultados	98
6.	Análisis de sensibilidad de parámetros en muro Minnow Creek	108
6.1.	Rigidez del suelo de fundación	109
6.2.	Rigidez del refuerzo	114
6.3.	Rigidez de los cojinetes.....	120
6.4.	Refinamiento del mallado.....	126
6.5.	Modificación del espaciamiento vertical del refuerzo	130
6.6.	Modelamiento sin interfaz suelo-panel	135
7.	Simulación de proceso de compactación.....	139
7.1.	Esfuerzos inducidos mediante el proceso de compactación en suelos reforzados	139
7.2.	Implementación Inicial.....	140
7.2.1	Modelo base adaptado	140
7.2.2	Modelo Hiperbólico: Mohr-Coulomb Modificado	141
7.2.3	Resultados.....	144
7.3.	Influencia del proceso constructivo y distancia de compactación	148
7.4.	Influencia de la magnitud de la sobrecarga.....	149
7.5.	Modelamiento final	153
8.	Conclusiones	157
9.	Recomendaciones	159

10. Bibliografía 160

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Características suelo de relleno, AASHTO (2012).	14
Tabla 2.2 Resumen desempeño al arranque para distintos tipos de refuerzos. Adaptada Berg et al. (2009).....	23
Tabla 3.1 Resumen parámetros estabilidad externa.	39
Tabla 3.2 Resumen estabilidad externa. Caso Base.....	43
Tabla 3.3 Propiedades de los refuerzos.	46
Tabla 3.4 Espaciamiento horizontal estimado del muro Minnow Creek.	47
Tabla 3.5: Resumen cargas máximas y de arranque reportadas por Runser (1999). .	49
Tabla 3.6 Parámetros utilizados para el cálculo de carga máxima, Coherent Gravity Method.	52
Tabla 3.7 Parámetros utilizados para factores de seguridad arranque y rotura, Coherent Gravity Method.	53
Tabla 3.8 Parámetros utilizados para factores de seguridad arranque y rotura, FHWA Structure Stiffness Method.	55
Tabla 3.9 Parámetros utilizados para el cálculo de carga máxima, FHWA Structure Stiffness Method.....	56
Tabla 3.10 Parámetros utilizados para factores de seguridad arranque y rotura, Simplified Method.....	57
Tabla 3.11 Parámetros utilizados para el cálculo de carga máxima, Simplified Method.	58
Tabla 3.12 Error asociado a cada metodología de diseño, Caso Base.....	59
Tabla 3.13 Error asociado a cada metodología de diseño, Caso sobrecarga multiplicada por dos $q^* = 2q = 24 \text{ kPa}$	60
Tabla 3.14 Error asociado a cada metodología de diseño, Caso sobrecarga multiplicada por dos $q^* = 0 \text{ kPa}$	61
Tabla 3.15 Resumen capacidad de arranque.....	62
Tabla 4.1 Parámetros para el modelamiento de los distintos tipos de suelo.....	70
Tabla 4.2 Elementos estructurales PLAXIS.....	73
Tabla 4.3: Elementos estructurales GTS-NX.....	76
Tabla 4.4 Resumen interfaces suelo-panel entre ambos programas.	78
Tabla 5.1 Propiedades cojinete modelo trilineal.	91
Tabla 5.2 Propiedades de los refuerzos.....	92

Tabla 5.3 Parámetros de suelo utilizados en el modelamiento en GTS-NX.....	96
Tabla 6.1 Resumen número de nodos y tiempo de cálculo.....	127
Tabla 6.2 Resumen de propiedades de los modelos	131
Tabla 7.1 Valores utilizados en la implementación del modelo Mohr-Coulomb Modificado en el suelo de refuerzo.....	143

Índice de Figuras

Figura 1.1 Esquema muro mecánicamente estabilizado. Adaptada de Tierra Armada.	2
Figura 2.1 Tipos de estructuras de contención. Tiznado (2010).....	5
Figura 2.2 Esquema 2D muro mecánicamente estabilizado. Adaptada Schmidt et al. (2011).....	6
Figura 2.3 Variación de costos en función de la altura para distintos sistemas de contención. Adaptada Hatami and Bathurst (2001).....	7
Figura 2.4 Ejemplo Muro Crib-Bin, Jara (2010).....	8
Figura 2.5 Carretera Aeropuerto Seattle. 46 m de altura, Tierra Armada.....	9
Figura 2.6 Muro chancador El Tesoro, Calama, Chile. Tierra Reforzada.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2.7 Principio básico del comportamiento de un suelo reforzado Adaptada Skok (2010).....	10
Figura 2.8 Ilustración tipos de refuerzo. Adaptada Kitch (2012).....	11
Figura 2.9 Superficie de falla asumida para distintos tipos de refuerzo. Adaptada Berg et al. (2009).	12
Figura 2.10 Paneles Prefabricados de hormigón tipo cruciforme, Tierra Armada.	13
Figura 2.11 Tipos de cojinetes entre paneles. DICTUC, (2009).....	15
Figura 2.12 Cargas verticales en la base del muro medidas en muros instrumentados. Adaptada Damians et al.(2013).....	15
Figura 2.13 Agrietamiento de la calzada debido a la rotura de conexiones suelo-refuerzo, Schmidt et al. (2011).	16
Figura 2.14 Agrietamiento de paneles, Schmidt et al. (2011).....	17
Figura 2.15 Dislocación de la fachada, Schmidt et al. (2011).	17
Figura 2.16 Falla por conexiones del muro construido en Idaho EE.UU, el día 12 de Julio de 2002, Armour et al. (2004).	18
Figura 2.17 Pérdida de contenido fino de arenas, Chen et al. (2007).	18
Figura 2.18 Colapso muro mecánicamente estabilizado en Virginia, Scarborough (2005).....	19
Figura 2.19 Dislocación entre paneles de Hormigón, Neely and Tan (2010).	19
Figura 2.20 Agrietamiento entre paneles de Hormigón, Neely and Tan (2010).....	20
Figura 2.21 Mecanismos de transferencia de esfuerzos. Adaptada Berg et al. (2009).	21
Figura 2.22 Transferencia de esfuerzos por fricción entre el suelo y el refuerzo. Adaptada Berg et al. (2009).	22

Figura 2.23 Modelo de arrancamiento, geometría y cargas. Bathurst et al. (2011).	24
Figura 2.24 Valores de fricción aparente para distintos tipos de refuerzos en suelo granulares. Lajevardi et al. (2013).	25
Figura 2.25 Compactación pesada realizada en muros mecánicamente estabilizados.	26
Figura 2.26 Coeficiente de Empuje lateral. AASHTO (2012).	27
Figura 2.27 Concepto de cohesión aparente. Holtz and Lee (2001).	28
Figura 2.28 Modelamiento del suelo a partir de ensayos triaxiales. Huang et al. (2009).	29
Figura 2.29 Estados de cargas para elementos de suelo. Holtz and Lee (2001).	29
Figura 2.30 Envolvente de falla plano $\tau - \sigma$	30
Figura 2.31 Trayectoria de tensiones plano q-p	31
Figura 2.32 Comportamiento rígido perfectamente plástico	33
Figura 2.33 Modelo numérico realizado en diferencias finitas. Huang et al. (2009).	34
Figura 3.1 Curva empírica para estimar el desplazamiento lateral en muros de tierra mecánicamente estabilizada. Adaptada Wu and Lee (2013).	36
Figura 3.2 Adaptación geometría y elementos Minnow Creek.	37
Figura 3.3 Simplificación geométrica y configuración de fuerzas del Minnow Creek.	38
Figura 3.4 Estabilidad Externa del muro, distintos tipos de falla (Adaptada Jara Mori, 2010).	39
Figura 3.5 Configuración de fuerzas para el cálculo de estabilidad externa.	42
Figura 3.6 Variación de los factores de seguridad en función de la sobrecarga.	44
Figura 3.7 Variación de los factores de seguridad en función del ángulo de fricción del suelo retenido.	44
Figura 3.8 Estabilidad Interna, tipos de falla (Mathew and Kathi 2014).	45
Figura 3.9 Plano de falla asumido para el Minnow Creek.	49
Figura 3.10 Distribución coeficiente de empuje horizontal en función de la altura Allen et al. 2001.	50
Figura 3.11 Mediciones en muros mecánicamente estabilizados con refuerzo inextensible del coeficiente de transmisión de esfuerzos horizontales Allen et al. 2001.	51
Figura 3.12 Comparación cargas máximas medidas v/s estimadas por Coherent Gravity Method.	52
Figura 3.13 Factores de seguridad para las distintas mediciones, Coherent Gravity Method.	53

Figura 3.14 Factores de seguridad para las distintas mediciones, FHWA Structure Stiffness Method.....	55
Figura 3.15 Comparación cargas máximas medidas v/s estimadas por FHWA Structure Stifness Method.....	56
Figura 3.16 Factores de seguridad para las distintas mediciones, Simplified Method.....	57
Figura 3.17 Comparación cargas máximas medidas v/s estimadas por Simplified Method.	58
Figura 3.18 Comparación cargas máximas medidas v/s todas las metodologías, Caso Base.	59
Figura 3.19 Comparación cargas máximas medidas v/s todas las metodologías, Caso sobrecarga multiplicada por dos $q * = 2q = 24 \text{ kPa}$	60
Figura 3.20 Comparación cargas máximas medidas v/s todas las metodologías, Caso sin sobrecarga $q * = 0 \text{ kPa}$	61
Figura 3.21 Comparación capacidad de arranque medido v/s capacidad estimada. ...	62
Figura 4.1 Componentes de esfuerzos en 3D y para el caso de deformaciones planas. Adaptada Sadd (2014).	63
Figura 4.2 Inclinación planos de falla caso activo y pasivo. Adaptada Saez (2010)...	64
Figura 4.3 Ejemplos de problemas llevados a deformaciones planas.....	66
Figura 4.4 a) Comportamiento real del suelo, b) Modelo Mohr-Coulomb elasto-plástico perfecto.	68
Figura 4.5 Representación modelo muro mecánicamente estabilizado.	69
Figura 4.6 Modelo Plaxis, vista general.....	70
Figura 4.7 Modelo Plaxis ampliado en la zona de refuerzo.....	71
Figura 4.8 Implementación interfaz espesor cero en PLAXIS.	72
Figura 4.9 Modelo GTS-NX, vista general.....	74
Figura 4.10 Modelo GTS-NX ampliado en la zona de refuerzo.....	75
Figura 4.11 Representación grados de libertad elementos estructurales, GTS-NX (2015).....	75
Figura 4.12 Comportamiento que rige a los refuerzos, GTS NX (2015).....	76
Figura 4.13 Implementación interfaz elementos continuos en GTS-NX.	77
Figura 4.14 Relación entre interfaz virtual e interfaz de elementos continuos. Adaptada Damians et al. (2015).....	77
Figura 4.15 Comparación distribución de cargas verticales sobre los paneles de fachada.	79
Figura 4.16 Comparación distribución cargas axiales en el refuerzo 2.	80

Figura 4.17 Comparación distribución cargas axiales en el refuerzo 4.	80
Figura 4.18 Comparación distribución cargas axiales en el refuerzo 6.	81
Figura 4.19 Comparación distribución cargas axiales en el refuerzo 8.	81
Figura 4.20 Comparación distribución cargas axiales en el refuerzo 10.	82
Figura 4.21 Comparación distribución cargas axiales en el refuerzo 12.	82
Figura 4.22 Resumen comparación cargas en los refuerzos.	83
Figura 4.23 Comparación empuje horizontal contra la fachada el muro.	83
Figura 4.24 Comparación Empuje horizontal a 0.5m de la fachada el muro.	84
Figura 4.25 Comparación Empuje horizontal a 3m de la fachada el muro.	84
Figura 4.26 Comparación desplazamientos laterales de la fachada.	85
Figura 4.27 Comparación modelos deformados multiplicado por factor de 25.....	85
Figura 4.28 Comparación modelos zonas de plastificación.	86
Figura 5.1 Muro Minnow Creek. Runser et al. (2001).....	88
Figura 5.2 Instrumentación Minnow Creek. Adaptada Damians et al. (2014).....	89
Figura 5.3 Representación 2D Minnow Creek.....	90
Figura 5.4 Curva esfuerzo-deformación de compresión 2do cojinete medido durante la construcción.	91
Figura 5.5 Modelo de elementos finitos del Minnow Creek, GTS-NX.....	92
Figura 5.6 Ensayos triaxiales realizados al suelo de relleno, Runser (1999)	93
Figura 5.9 Curvas de ensayos triaxiales y modelos Mohr-Coulomb utilizados para modelar el suelo de refuerzo, adaptada Damians 2014.	95
Figura 5.10 Curvas de ensayos triaxiales y modelos Mohr-Coulomb utilizados en el modelo para suelo de retención, adaptada Damians 2014.	95
Figura 5.11 Análisis de sensibilidad de cargas verticales para distintos valores de rigidez y resistencia.	97
Figura 5.12 Carga vertical para distintos valores de rigidez de la interfaz suelo-panel, resistencia $\phi=18^\circ$	98
Figura 5.13 Compresión cojinete 2, para distintos valores de rigidez de la interfaz suelo-panel, resistencia $\phi=18^\circ$	99
Figura 5.14 Carga axial en el refuerzo 3 para distintos valores de rigidez de la interfaz suelo-panel.....	99
Figura 5.15 Carga axial en el refuerzo 7 para distintos valores de rigidez de la interfaz suelo-panel.....	100
Figura 5.16 Carga axial en el refuerzo 11 para distintos valores de rigidez de la interfaz suelo-panel.....	100

Figura 5.17 Carga axial en el refuerzo 15 para distintos valores de rigidez de la interfaz suelo-panel.....	101
Figura 5.18 Carga axial en el refuerzo 19 para distintos valores de rigidez de la interfaz suelo-panel.....	101
Figura 5.19 Variación coeficiente lateral de esfuerzos y adherencia suelo-refuerzo. Adaptada Runser et al. (2001).	102
Figura 5.20 Empuje horizontal contra la fachada el muro para distintos valores de rigidez suelo-panel.	102
Figura 5.21 Empuje horizontal a 5.5m de la fachada el muro para distintos valores de rigidez suelo-panel.	103
Figura 5.22 Empuje horizontal a 12m de la fachada el muro para distintos valores de rigidez suelo-panel.	104
Figura 5.23 Deformaciones laterales para distintos valores de rigidez suelo-panel. .	105
Figura 5.24 Comparación cargas verticales en los paneles de fachada.	106
Figura 5.25 Comparación entre mediciones con elementos finitos.	106
Figura 5.26 Comparación entre todos los métodos utilizados.	107
Figura 6.1 Deformación lateral de la fachada para distintos suelos de fundación.....	109
Figura 6.2 Asentamientos de la fachada para distintos suelos de fundación.	110
Figura 6.3 Cargas en el refuerzo 3 para distintos suelos de fundación.....	111
Figura 6.4 Cargas en el refuerzo 7 para distintos suelos de fundación.....	111
Figura 6.5 Cargas en el refuerzo 11 para distintos suelos de fundación.....	112
Figura 6.6 Cargas en el refuerzo 15 para distintos suelos de fundación.....	112
Figura 6.7 Cargas en el refuerzo 19 para distintos suelos de fundación.....	113
Figura 6.8 Carga vertical sobre los paneles de fachada para distintos suelos de fundación.....	113
Figura 6.9 Deformación lateral para distintos tipos de refuerzos.....	115
Figura 6.10 Superficie de falla, caso refuerzo $E=2.1\text{GPa}$	116
Figura 6.11 Asentamientos de la fachada para distintos refuerzo.....	116
Figura 6.12 Cargas en el refuerzo 3 para distintos refuerzos.....	117
Figura 6.13 Cargas en el refuerzo 7 para distintos refuerzos.....	117
Figura 6.14 Cargas en el refuerzo 11 para distintos refuerzos.....	118
Figura 6.15 Cargas en el refuerzo 15 para distintos refuerzos.....	118
Figura 6.16 Cargas en el refuerzo 19 para distintos refuerzos.....	119
Figura 6.17 Carga vertical sobre los paneles de fachada para distintos refuerzos. ..	119

Figura 6.18 Cargas verticales en la base del muro medidas en muros instrumentados (Adaptada Damians et.al 2013).....	120
Figura 6.19 Descomposición de cargas verticales aplicadas a la fachada del muro (Damians et.al 2016).	121
Figura 6.20 Tipos de cojinetes sometidos a ensayos, DICTUC 2009.	121
Figura 6.21 Montajes realizados a cojinetes de prueba, DICTUC 2009.....	122
Figura 6.22 Resultados ensayos realizados para diferentes muestras de cojinetes, DICTUC 2009.....	122
Figura 6.23 Comportamiento fuerza-deformación para 3 condiciones de cojinetes..	123
Figura 6.24 Comparación compresión 2do cojinete durante el proceso constructivo.	123
Figura 6.25 Comparación cargas verticales en los paneles de fachada.	124
Figura 6.26 Asentamiento para distintos tipos de cojinetes.	125
Figura 6.27 Modelos implementados con distinto número de nodos.....	126
Figura 6.28 Zona de refuerzo ampliada	126
Figura 6.29 Cargas verticales sobre los paneles de fachada para distintos mallados	127
Figura 6.30 Cargas en los refuerzos para distintos mallados.....	128
Figura 6.31 Deformación lateral para distintos mallados.....	129
Figura 6.32 Modelos implementados con distinto espaciamiento vertical de refuerzos	130
Figura 6.33 Espaciamiento vertical para cada caso de estudio	130
Figura 6.34 Cargas verticales sobre los paneles de fachada para distintos espaciamientos	131
Figura 6.35 Carga refuerzo 3 para distintos espaciamientos verticales del refuerzo	132
Figura 6.36 Carga refuerzo 7 para distintos espaciamientos verticales del refuerzo	132
Figura 6.37 Carga refuerzo 11 para distintos espaciamientos verticales del refuerzo	133
Figura 6.38 Carga refuerzo 15 para distintos espaciamientos verticales del refuerzo	133
Figura 6.39 Carga refuerzo 19 para distintos espaciamientos verticales del refuerzo	133
Figura 6.40 Deformación horizontal para distintos espaciamientos verticales del refuerzo	134
Figura 6.41 Comparación cargas verticales en los paneles de fachada para modelo sin interfaz suelo-panel.	136
Figura 6.42 Cargas en el refuerzo 3 modelo sin interfaz suelo-panel.	136
Figura 6.43 Cargas en el refuerzo 7 modelo sin interfaz suelo-panel.	137
Figura 6.44 Cargas en el refuerzo 11 modelo sin interfaz suelo-panel.	137

Figura 6.45 Cargas en el refuerzo 15 modelo sin interfaz suelo-panel.	138
Figura 6.46 Cargas en el refuerzo 19 modelo sin interfaz suelo-panel.	138
Figura 7.1 Patrón de esfuerzos laterales inducidos por la compactación, (Duncan and Seed 1980).....	139
Figura 7.2 Variación coeficiente de empuje lateral para tiras de acero, (AASHTO 2012).	140
Figura 7.3 Variación coeficiente de Poisson.....	141
Figura 7.4 Relación hiperbólica tensión-deformación para ensayos triaxiales drenados.	142
Figura 7.5 Determinación del valor de E_{oedref} en ensayos oedométricos.	143
Figura 7.6 Comparación cargas verticales en los paneles de fachada para distintos modelos.....	144
Figura 7.7 Cargas en el refuerzo 3 para distintos modelos.	145
Figura 7.8 Cargas en el refuerzo 7 para distintos modelos.	145
Figura 7.9 Cargas en el refuerzo 11 para distintos modelos.	146
Figura 7.10 Cargas en el refuerzo 15 para distintos modelos.	146
Figura 7.11 Cargas en el refuerzo 19 para distintos modelos.	147
Figura 7.12 Comparación cargas axiales máximas.....	147
Figura 7.13 Deformación lateral para distintos modelos.	148
Figura 7.14 Modelación de compactación mediante carga equivalente de compactador Hamm 2410SD, (Runser 1999).	149
Figura 7.15 Comparación cargas verticales en los paneles de fachada para distintas sobrecargas de compactación.....	150
Figura 7.16 Cargas en el refuerzo 3 para distintas sobrecargas de compactación...	150
Figura 7.17 Cargas en el refuerzo 7 para distintas sobrecargas de compactación...	151
Figura 7.18 Cargas en el refuerzo 11 para distintas sobrecargas de compactación.	151
Figura 7.19 Cargas en el refuerzo 15 para distintas sobrecargas de compactación.	151
Figura 7.20 Cargas en el refuerzo 19 para distintas sobrecargas de compactación.	152
Figura 7.21 Deformación lateral para distintas sobrecargas de compactación.	152
Figura 7.22 Comparación cargas verticales en los paneles de fachada para distintos valores de la rigidez de corte de la interfaz.	153
Figura 7.23 Cargas en el refuerzo 3 para distintos valores de rigidez de corte de la interfaz	154

Figura 7.24 Cargas en el refuerzo 7 para distintos valores de rigidez de corte de la interfaz	154
Figura 7.25 Cargas en el refuerzo 11 para distintos valores de rigidez de corte de la interfaz	155
Figura 7.26 Cargas en el refuerzo 15 para distintos valores de rigidez de corte de la interfaz	155
Figura 7.27 Cargas en el refuerzo 19 para distintos valores de rigidez de corte de la interfaz	156
Figura 7.28 Deformación lateral para distintos valores de rigidez de corte de la interfaz	156