

Tabla de Contenido

CAPÍTULO I: Introducción.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Plan de trabajo.....	4
CAPITULO II: Revisión Bibliográfica y antecedentes generales.....	6
2.1. Actividad portuaria en Chile.....	6
2.2. Obras de abrigo: Rompeolas.....	8
2.2.1. Rompeolas de talud tipo escollera.....	9
Caracterización geotécnica de los elementos de coraza, en términos de parámetros de Mohr-Coulomb.....	16
Modos típicos de falla.....	20
2.3. Antecedentes de análisis sísmico en obras portuarias.....	21
2.3.1. Normativa chilena y extranjera para el Diseño Sísmico en obras portuarias. ..	21
2.3.2. Daños reportados en Chile en obras portuarias, posterior a sismos.....	22
Terremoto Valdivia 1960.....	23
Terremoto Valparaíso 1985.....	23
Terremoto Tarapacá 2005.....	25
Terremoto Maule 2010.....	25
Terremoto Iquique 2014.....	27
2.3.3. Revisión de análisis y diseño sísmico de rompeolas a nivel mundial.....	27
Primer estudio sobre comportamiento sísmico de rompeolas.....	27
Contraste de modelos físicos y numéricos.....	29
Estudios en rompeolas reales en el extranjero, frente a cargas sísmicas.....	30
Consideraciones sísmicas de rompeolas en Chile.....	33
CAPITULO III: Propuesta Metodológica para el análisis sísmico de rompeolas de talud tipo escollera.....	35

Diseño y verificación de rompeolas de talud tipo escollera	35
3.1. Diseño hidráulico y estructural	35
3.2. Verificación sísmica	35
3.2.1. Análisis de estabilidad sísmica.....	37
3.2.2. Estudio de desplazamientos	51
CAPITULO IV: Aplicación de la metodología propuesta	56
Revisión casos de estudio.....	56
4.1. Rompeolas Puerto de Arica.....	57
4.1.1. Análisis de estabilidad frente a deslizamiento horizontal	58
4.1.2. Análisis de estabilidad frente a deslizamientos de talud	62
4.1.3. Estudio de desplazamientos	69
4.2. Rompeolas Puerto de San Vicente.....	70
4.2.1. Análisis de estabilidad frente a deslizamiento horizontal	71
4.2.2. Análisis de estabilidad frente a deslizamientos de talud	72
4.2.3. Estudio de desplazamientos	75
4.3. Rompeolas Club de Yates de Papudo.....	76
4.3.1. Análisis de estabilidad frente a deslizamiento horizontal	77
4.3.2. Análisis de estabilidad frente a deslizamientos de talud	78
4.3.3. Estudio de desplazamientos	81
4.4. Rompeolas Caleta Higuierillas	81
4.4.1. Análisis de estabilidad frente a deslizamiento horizontal	83
4.4.2. Análisis de estabilidad frente a deslizamientos de talud	83
4.4.3. Estudio de desplazamientos	87
4.5. Rompeolas Puerto de Grandes Dimensiones.....	87
4.5.1. Análisis de estabilidad frente a deslizamiento horizontal	87
4.5.2. Análisis de estabilidad frente a deslizamientos de talud.....	88
4.5.3. Estudio de desplazamientos	92
CAPITULO V: Análisis y discusión de resultados.....	93

5.	Análisis de resultados	93
5.1.	Método propuesto	93
5.2.	Análisis sísmico de estabilidad: resultados obtenidos	95
5.2.1.	Resultados del análisis sísmico de estabilidad frente a desplazamientos horizontales.....	95
5.2.2.	Resultados del análisis sísmico de estabilidad frente a deslizamientos de talud. 97	
5.3.	Estudio de desplazamientos: resultados obtenidos y comparación con datos reales. 97	
5.3.1.	Rompeolas Puerto de Arica	98
5.3.2.	Rompeolas Puerto de San Vicente	99
5.3.3.	Rompeolas Club de Yates de Papudo y Caleta Higuierillas	99
5.3.4.	Rompeolas Puerto de Grandes Dimensiones.....	99
	CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones	101
6.1.	Conclusiones	101
6.2.	Recomendaciones	103
	Bibliografía	105
	Anexos	110
1.	Rompeolas Puerto de Arica	110
1.1.	Resultados análisis de estabilidad Rompeolas Puerto de Arica	110
1.2.	Resultados análisis de desplazamiento Rompeolas Puerto de Arica.....	112
2.	Rompeolas Puerto de San Vicente	115
2.1.	Resultados análisis de estabilidad Rompeolas Puerto de San Vicente	116
2.2.	Resultados análisis de desplazamientos Rompeolas Puerto de San Vicente	119
3.	Rompeolas Club de Yates de Papudo	120
3.1.	Resultados análisis de estabilidad Rompeolas Club de Yates de Papudo.....	120
4.	Rompeolas Caleta Higuierillas.....	123
4.1.	Resultados análisis de estabilidad Rompeolas Caleta Higuierillas	124
5.	Rompeolas Puerto de Grandes Dimensiones	127

5.1. Resultados análisis de estabilidad Rompeolas Puerto de Grandes Dimensiones..	129
5.2. Resultados análisis de desplazamientos Rompeolas Puerto de Grandes Dimensiones.....	132

Índice de Figuras

Figura 1: Esquemas rompeolas de talud tipo escollera. a.1)Multicapa a.2)Multicapa con superestructura b)Berma c)Sumergido. Fuente: Fernández, R (2010).	10
Figura 2: Ejemplos de elementos artificiales (dolos de hormigón). Fuente: Coastal Engineering Manual	14
Figura 3: Ángulo de fricción ϕ para escollera depositada. Fuente: FHWA(1989).....	18
Figura 4: Modos de falla típicos. Fuente: Negro, V. (2002).....	21
Figura 5: Puerto Montt, posterior a Valdivia 1960. Fuente http://puertomontt.blogspot.cl/	23
Figura 6: Corte transversal rompeolas. Fuente: Torres, A. (2014)	24
Figura 7: Puerto de San Antonio, posterior a Valparaíso 1985. Fuente: Torres, A. (2014)....	24
Figura 8: Puerto de Valparaíso, posterior a Valparaíso 1985. Fuente: González, J (2015)...	25
Figura 9: Puerto de Talcahuano, posterior a Maule 2010. Fuente: Fenaporchi (2010)	26
Figura 10: Sección transversal modelo físico. Fuente: Coastal Engineering 1978	29
Figura 11: Rompeolas Pars Petrochemical Port. Fuente: Banjimali, B et al. 2010	33
Figura 12: Diagrama para análisis de estabilidad frente a deslizamiento horizontal. Fuente: Elaboración propia (*W: peso propio, F_h : fuerza sísmica horizontal, E_w : Empuje sísmico del agua, N: fuerza normal, T: fuerza resistente al corte, F_H : fuerza oleaje negativo, $k_{h/v}$: coeficiente sísmico horizontal/vertical)	38
Figura 13: Diagrama para análisis de estabilidad frente a deslizamiento de talud, lado mar. Fuente: elaboración propia. (* p_H : esfuerzo oleaje negativo, P_w : presión hidrodinámica, τ : resistencia al corte, c y ϕ : parámetros de Mohr-Coulomb, γ : peso unitario).....	38
Figura 14: Diagrama para el análisis de estabilidad frente a deslizamiento de talud, lado puerto. Fuente: elaboración propia. (* P_w : presión hidrodinámica, τ : resistencia al corte, c y ϕ : parámetros de Mohr-Coulomb, γ : peso unitario).....	38
Figura 15: Zonificación sísmica. Fuente: NCh2369 Of2003.....	42
Figura 16: Método de Newmark. Fuente: Geotechnical earthquake engineering, S.Kramer 1996.....	52
Figura 17: Diagrama de flujo verificación sísmica pseudo-estática.....	55
Figura 18: Ubicación Puerto de Arica. Fuente: Google Earth ®.....	58
Figura 19: Perfil tipo Rompeolas Puerto de Arica. Elaboración propia.....	58
Figura 20: Mapa de peligro sísmico. Fuente: Nuñez I et al (2015).....	60
Figura 21: Talud Perfil tipo lado mar, Rompeolas Puerto de Arica (Slide ®).....	63
Figura 22: Talud perfil tipo lado puerto, Rompeolas Puerto de Arica (Slide ®)	65
Figura 23: Análisis de Montecarlo sobre talud lado mar, Rompeolas Puerto de Arica. Slide ®	68

Figura 24: Análisis de Montecarlo sobre talud lado puerto, Rompeolas Puerto de Arica. Slide®	68
Figura 25: Ubicación Puerto de San Vicente. Fuente: Google Earth ®.....	71
Figura 26: Perfil 30, Rompeolas Puerto de San Vicente	71
Figura 27: Ubicación Club de Yates de Papudo. Fuente: Google Earth ®	77
Figura 28: Perfil tramo 3, Rompeolas Club de Yates de Papudo.....	77
Figura 29: Ubicación Caleta Higuierillas. Fuente: Google Earth ®.....	82
Figura 30: Perfil corte 5-5, Rompeolas Caleta Higuierillas.....	82
Figura 33: Perfil Sección Tramo D1, Puerto de Grandes Dimensiones.....	87
Figura 34: Perfil 28, Rompeolas Puerto de San Vicente.....	115
Figura 35: Perfil 31, Rompeolas Puerto San Vicente.....	115
Figura 36: Análisis de Montecarlo sobre talud lado mar, Rompeolas Puerto de San Vicente. Slide®	118
Figura 37: Análisis de Montecarlo sobre talud lado puerto, Rompeolas Puerto de San Vicente. Slide®.....	118
Figura 38: Perfil tramo 2, Rompeolas Club de Yates de Papudo.....	120
Figura 39: Análisis de Montecarlo sobre talud lado mar, Rompeolas Club de Yates de Papudo. Slide®	122
Figura 40: Análisis de Montecarlo sobre talud lado puerto, Rompeolas Club de Yates de Papudo. Slide®	123
Figura 41: Perfil corte 4-4, Rompeolas Caleta Higuierillas.....	123
Figura 42: Análisis de Montecarlo sobre talud lado mar, Rompeolas Caleta Higuierillas. Slide®	126
Figura 43: Análisis de Montecarlo sobre talud lado puerto, Rompeolas Caleta Higuierillas. Slide®	127
Figura 44: Perfil Tramo B1, Puerto de Grandes Dimensiones.	127
Figura 45: Perfil Tramo D02, Puerto de Grandes Dimensiones.	128
Figura 46: Análisis de Montecarlo sobre talud lado mar, Rompeolas Puerto de Grandes Dimensiones. Slide®.....	131
Figura 47: Análisis de Montecarlo sobre talud lado puerto, Rompeolas Puerto de Grandes Dimensiones. Slide®.....	131

Índice de Tablas

Tabla 1: Tasas estimadas de crecimiento por tipo de carga. Fuente: DOP 2009 (en base a estudio Diagnóstico Modo de Transporte Marítimo)	8
Tabla 2: Coeficientes de fricción. Fuente: OCDI 2001	16
Tabla 3: Coeficientes de fricción experimentales. Hudson, R (1959)	17
Tabla 4: Coeficiente de estabilidad. Fuente: Hudson (1959)	19
Tabla 5: Valor de la aceleración efectiva máxima. Fuente: NCh2369 Of2003, Tabla 5.2.....	42
Tabla 6: Limite de excedencia de desplazamientos. Fuente: OCDI 2001	53
Tabla 7: Diámetro característico. Fuente: Van de Meer (1988)	54
Tabla 8: Factor de Seguridad asociado a desplazamiento horizontal, Perfil Tipo, con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Puerto de Arica.	61
Tabla 9: Factor de Seguridad asociado a desplazamiento horizontal, Perfil Tipo, con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Puerto de Arica.	62
Tabla 10: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado mar, Rompeolas Puerto de Arica	67
Tabla 11: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado puerto, Rompeolas Puerto de Arica	67
Tabla 12: Factor de seguridad asociado a desplazamiento horizontal, con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Puerto de San Vicente.....	72
Tabla 13: Factor de seguridad asociado a desplazamiento horizontal, con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Puerto de San Vicente.....	72
Tabla 14: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado mar, Rompeolas Puerto de San Vicente	75
Tabla 15: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado puerto, Rompeolas Puerto de San Vicente	75
Tabla 16. Factor de seguridad asociado a desplazamiento horizontal, con $k_v=1/3k_h$, Club de Yates de Papudo.....	78
Tabla 17: Factor de seguridad asociado a desplazamiento horizontal, con $k_v=2/3k_h$, Club de Yates de Papudo.....	78
Tabla 18: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado mar, Rompeolas Club de Yates de Papudo.....	81
Tabla 19: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado puerto, Rompeolas Club de Yates de Papudo.....	81
Tabla 20: Factor de seguridad asociado a desplazamiento horizontal, con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Caleta Higuierillas	83
Tabla 21: Factor de seguridad asociado a desplazamiento horizontal, con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Caleta Higuierillas	83

Tabla 22: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado mar, Rompeolas Caleta Higuierillas	86
Tabla 23: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado puerto, Rompeolas Caleta Higuierillas.	86
Tabla 24. Factor de seguridad asociado a deslizamiento horizontal, $k_v=1/3k_h$, Puerto de Grandes Dimensiones.....	88
Tabla 25: Factor de seguridad asociado a deslizamiento horizontal, $k_v=1/3k_h$, Puerto de Grandes Dimensiones.....	88
Tabla 26: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado mar, Rompeolas Puerto de Grandes Dimensiones	91
Tabla 27: Análisis de Montecarlo, falla de talud lado puerto, Rompeolas Puerto de Grandes Dimensiones	91
Tabla 28: Resumen resultados análisis de estabilidad	95
Tabla 29: Resultados análisis de desplazamientos	98
Tabla 30: Materiales y áreas perfiles Rompeolas Puerto de Arica.....	110
Tabla 31: Peso propio Perfil tipo, Rompeolas Puerto de Arica.	110
Tabla 32: Fuerza sísmica sobre perfil tipo, con $k_v=1/3k_h$. Rompeolas Puerto de Arica.	110
Tabla 33: Fuerza sísmica sobre perfil tipo, con $k_v=2/3k_h$. Rompeolas Puerto de Arica.	110
Tabla 34: Empuje sísmico del agua, Perfil tipo, Rompeolas Puerto de Arica	110
Tabla 35: Fuerza Normal con $k_v=1/3k_h$, Perfil Tipo, Rompeolas Puerto Arica	110
Tabla 36: Fuerza Normal con $k_v=2/3k_h$, Perfil Tipo, Rompeolas Puerto Arica	111
Tabla 37: Resistencia al corte, con $k_v=1/3k_h$, Perfil Tipo, Rompeolas Puerto Arica	111
Tabla 38: Resistencia al corte, con $k_v=2/3k_h$, Perfil Tipo, Rompeolas Puerto Arica	111
Tabla 39: Propiedades de los materiales. Rompeolas Puerto de Arica.....	111
Tabla 40: Materiales y áreas Perfil 28. Rompeolas Puerto de San de Vicente	115
Tabla 41: Materiales y áreas Perfil 30. Rompeolas Puerto de San Vicente	115
Tabla 42: Materiales y áreas Perfil 31. Rompeolas Puerto de San Vicente	116
Tabla 43: Peso propio perfiles Rompeolas Puerto de San Vicente.....	116
Tabla 44: Fuerza sísmica con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Puerto de San Vicente	116
Tabla 45: Fuerza sísmica con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Puerto de San Vicente	116
Tabla 46: Empuje sísmico del agua, Rompeolas Puerto de San Vicente.....	117
Tabla 47: Fuerza normal, con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Puerto de San Vicente	117
Tabla 48: Fuerza normal, con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Puerto de San Vicente	117
Tabla 49: Resistencia al corte, con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Puerto de San Vicente	117
Tabla 50: Resistencia al corte, con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Puerto de San Vicente	117
Tabla 51: Propiedades Materiales. Rompeolas Puerto de San Vicente	117
Tabla 52: Materiales y áreas Perfil tramo 2, Club de Yates de Papudo.	120
Tabla 53: Materiales y áreas Perfil tramo 3, Club de Yates de Papudo.	120

Tabla 54: Peso propio, Rompeolas Club de Yates de Papudo.	120
Tabla 55: Fuerza sísmica, con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Club de Yates de Papudo.	121
Tabla 56: Fuerza sísmica, con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Club de Yates de Papudo.	121
Tabla 57: Empuje sísmico del agua, Rompeolas Club de Yates de Papudo.	121
Tabla 58: Fuerza normal, con $k_v=1/3k_h$, Club de Yates de Papudo.	121
Tabla 59: Fuerza normal, con $k_v=2/3k_h$, Club de Yates de Papudo.	121
Tabla 60: Resistencia al corte, con $k_v=1/3k_h$, Club de Yates de Papudo.	121
Tabla 61: Resistencia al corte, con $k_v=2/3k_h$, Club de Yates de Papudo.	122
Tabla 62: Propiedades materiales. Rompeolas Club de Yates de Papudo	122
Tabla 63: Materiales y áreas Perfil corte 4-4, Rompeolas Caleta Higuierillas.	124
Tabla 64: Materiales y áreas Perfil corte 5-5, Rompeolas Caleta Higuierillas.	124
Tabla 65: Peso propio, Rompeolas Caleta Higuierillas.	124
Tabla 66: Fuerza sísmica, con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Caleta Higuierillas.	124
Tabla 67: Fuerza sísmica, con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Caleta Higuierillas.	124
Tabla 68: Empuje sísmico del agua, Rompeolas Caleta Higuierillas.	125
Tabla 69: Fuerza Normal, con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Caleta Higuierillas.	125
Tabla 70: Fuerza Normal, con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Caleta Higuierillas.	125
Tabla 71: Resistencia al corte, con $k_v=1/3k_h$, Rompeolas Caleta Higuierillas.	125
Tabla 72: Resistencia al corte, con $k_v=2/3k_h$, Rompeolas Caleta Higuierillas.	125
Tabla 73: Propiedades Materiales. Rompeolas Caleta Higuierillas.	125
Tabla 74: Materiales y áreas, Perfil Tramo B1, Puerto de Grandes Dimensiones.	128
Tabla 75: Materiales y áreas, Perfil Tramo D1, Puerto de Grandes Dimensiones.	128
Tabla 76: Materiales y áreas, Perfil Tramo D02, Puerto de Grandes Dimensiones.	128
Tabla 77: Peso propio, Puerto de Grandes Dimensiones.	129
Tabla 78: Fuerza sísmica, $k_v=1/3k_h$, Puerto de Grandes Dimensiones.	129
Tabla 79: Fuerza sísmica, $k_v=2/3k_h$, Puerto de Grandes Dimensiones.	129
Tabla 80: Empuje sísmico del agua, Puerto de Grandes Dimensiones.	129
Tabla 81: Fuerza Normal, con $k_v=1/3k_h$, Puerto de Grandes Dimensiones.	129
Tabla 82: Fuerza Normal, con $k_v=2/3k_h$, Puerto de Grandes Dimensiones.	130
Tabla 83: Resistencia al corte, $k_v=1/3k_h$, Puerto de Grandes Dimensiones.	130
Tabla 84: Resistencia al corte, $k_v=2/3k_h$, Puerto de Grandes Dimensiones.	130
Tabla 85: Propiedades Materiales. Rompeolas Puerto de Grandes dimensiones.	130