



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

ANÁLISIS COMPARATIVO DE FORMULACIONES PARA EL DISEÑO DE DIQUES EN TALUD DE ROCA Y LA VERIFICACIÓN DE SU APLICABILIDAD EN CHILE

Cindy Loreto Bernal Ponce

Octubre 2015

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE FORMULACIONES PARA EL DISEÑO DE DIQUES EN TALUD DE
ROCA Y LA VERIFICACIÓN DE SU APLICABILIDAD EN CHILE**

Cindy Loreto Bernal Ponce

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

MATÍAS QUEZADA L.
Profesor Guía

MAURICIO REYES G.
Docente

PATRICIO WINCKLER G.
Docente

Declaración

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Matías Quezada Labra

Profesor Guía

Cindy Bernal Ponce

Alumna Memorista

Dedicatoria

A Juan y Gloria, mis padres

CONTENIDOS

1	Introducción	10
2	Objetivos	11
2.1	Objetivo general	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	Marco teórico	12
3.1	Tipologías estructurales de rompeolas	12
3.1.1	Dique vertical	12
3.1.2	Dique mixto	13
3.1.3	Dique en talud	13
3.2	Evolución histórica del diseño	20
3.3	Ecuaciones disponibles a la fecha	21
3.3.1	Fórmula de Castro (1933)	22
3.3.2	Fórmula de Iribarren (1938)	22
3.3.3	Fórmula de Mathews (1948)	23
3.3.4	Fórmula de Epstein & Tyrrel (1949)	23
3.3.5	Fórmula de Hickson & Rodolf (1951)	24
3.3.6	Fórmula de Larras (1952)	24
3.3.7	Fórmula de Hedar (1953)	25
3.3.8	Fórmula de Beaudevin (1955)	25
3.3.9	Fórmula de Hudson (1959)	26
3.3.10	Fórmula de Goldstein & Kononenko (1959)	27
3.3.11	Fórmula de SN-92-60 (1960)	27
3.3.12	Fórmula de Rybtchevsky (1964)	28
3.3.13	Fórmula de Svee (1965)	28
3.3.14	Fórmula de Iribarren (1965)	29
3.3.15	Fórmula de Metelicyna (1967)	29
3.3.16	Fórmula de Font (1968)	30
3.3.17	Fórmula de Taylor (1973)	30
3.3.18	Fórmula de SPM (1977)	30
3.3.19	Fórmula de Losada & Giménez-Curto (1979)	31
3.3.20	Fórmula de SPM (1984)	32
3.3.21	Fórmula de Hedar (1986)	33
3.3.22	Fórmula de Ryu & Sawaragi (1986)	34
3.3.23	Fórmula de Medina & McDougal (1988)	35

3.3.24	Fórmula de Van der Meer (1988a)	35
3.3.25	Fórmula de Kaku, Kobayashi & Ryu (1991).....	37
3.3.26	Fórmula de Koev (1992).....	38
3.3.27	Fórmula de Ben Belfadhel et al. (1993)	39
3.3.28	Fórmula de Ryu & Kim (1994).....	40
3.3.29	Fórmula de Vidal et al. (1999)	41
3.3.30	Fórmula de Hald & Burcharth (2000).....	43
3.3.31	Fórmula de Van Gent (2003).....	44
3.3.32	Fórmula de Melby & Hughes (2003).....	45
3.3.33	Fórmula de Yoo & Yoon (2013).....	46
4	Metodología	48
4.1	Análisis de sensibilidad	49
4.1.1	Alcances del análisis de sensibilidad.....	50
4.1.2	Definición de grupos de fórmulas	51
4.1.3	Definición de las características del oleaje	52
4.1.4	Diseño geométrico de alternativas de rompeolas	52
4.1.5	Escenarios	53
4.2	Aplicación a proyectos en Chile	54
4.2.1	Fuentes de información y tipos de proyectos considerados	54
4.2.2	Selección de las fórmulas	55
4.2.3	Verificación de las fórmulas	56
5	Resultados	57
5.1	Características de oleaje en Chile	57
5.1.1	Periodo y altura de ola	57
5.1.2	Altura umbral.....	57
5.1.3	Número de ola	58
5.2	Análisis de sensibilidad	61
5.2.1	Grupo 1	61
5.2.2	Grupo 2.....	67
5.2.3	Grupo 3.....	68
5.2.4	Grupo 4.....	69
5.2.5	Grupo 5.....	81
5.2.6	Grupo 6.....	89
5.2.7	Grupo 7.....	92
5.2.8	Grupo 8.....	97

5.2.9	Comentario general.....	100
5.3	Aplicación a proyectos en Chile	101
5.3.1	Estudio Bellavista, Valparaíso	101
5.3.2	Estudio El Trocadero, Antofagasta	104
5.3.3	Estudio Paraíso, Antofagasta	106
5.3.4	Estudio El Laucho, Arica	108
5.3.5	Estudio El Salitre, Antofagasta	110
5.3.6	Estudio de Tocopilla, Antofagasta	113
5.3.7	Comentario general.....	114
6	Discusión	115
7	Conclusiones y recomendaciones	116
8	Referencias bibliográficas	118
9	Anexos	123
9.1	Título 5.3.....	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1: Funciones básicas de los elementos de una estructura típica de roca	14
Tabla 3-2: Evaluación general del uso de rocas en estructuras marítimas	18
Tabla 3-3: Criterios disponibles para utilización de filtros para estructuras costeras.....	19
Tabla 3-4: Lista de fórmulas según año y autor para su respectivo tipo de oleaje.	21
Tabla 3-5: Criterios para utilizar la constante de estabilidad (extracto de la tabla).....	26
Tabla 3-6: Valores recomendados de KD para diseñar el tronco de la estructura	27
Tabla 3-7: Criterio para utilizar la constante de estabilidad en la fórmula de SPM (1977)....	31
Tabla 3-8: Coeficientes para la ecuación de Losada & Giménez-Curto (1979).....	32
Tabla 3-9: Criterio para utilizar la constante de estabilidad.....	33
Tabla 3-10: Datos necesarios para resolver la fórmula de Hedar (1986).	34
Tabla 3-11: Daño para rompeolas de roca con diámetros de 2 capas de ancho.	37
Tabla 3-12: Criterios de Estabilidad y Reverso R ($E_p = 2 D_n50$).	40
Tabla 3-13: Parámetros de ajuste para A, B y C diferenciado por sector.....	43
Tabla 3-14: Parámetros ajustados en los modelos de fuerza.	44
Tabla 3-15: Coeficientes en relación al tipo de coraza	47
Tabla 4-1: Formulaciones agrupadas	51
Tabla 4-2: Fórmulas elegidas	56
Tabla 5-1: Localidades y sus respectivas H_{umbral}	57
Tabla 5-2: Coeficientes equivalentes a diferentes niveles de daño.....	82
Tabla 5-3: Características principales proyecto Valparaíso (1988).....	101
Tabla 5-4: Rango de pesos de roca para múltiples autores en el estudio de Valparaíso	101
Tabla 5-5: Características principales proyecto Playa Trocadero (2004).....	104
Tabla 5-6: Rango de pesos de roca para múltiples autores en el estudio de Trocadero.....	104
Tabla 5-7: Características principales proyecto Playa Paraíso (2007).....	106
Tabla 5-8: Rango de pesos de roca para múltiples autores en el estudio de Paraíso.....	106
Tabla 5-9: Características principales proyecto Playa El Laucho (2008).....	108
Tabla 5-10: Rango de pesos de roca para múltiples autores en el estudio de El Laucho ...	108
Tabla 5-11: Características principales proyecto Playa El Salitre (2010).....	110
Tabla 5-12: Rango de pesos de roca para múltiples autores en el estudio de El Salitre.....	110
Tabla 5-13: Características principales proyecto Termoeléctrica Tocopilla (2012).....	113
Tabla 5-14: Rango de pesos de roca para múltiples autores en el estudio de Tocopilla.	113
Tabla 9-1: Datos del estudio Bellavista, Valparaíso.....	123
Tabla 9-2: Datos del estudio El Trocadero, Antofagasta.....	124
Tabla 9-3: Datos del estudio Paraíso, Antofagasta.....	124
Tabla 9-4: Datos del estudio El Laucho, Arica.	124
Tabla 9-5: Datos del estudio El Salitre, Antofagasta.....	124
Tabla 9-6: Datos del estudio Tocopilla, Antofagasta.....	125

LISTA DE FIGURAS

Fig. 3-1: Sección tipo de un dique vertical	12
Fig. 3-2: Dique mixto	13
Fig. 3-3: Elementos que componen un dique en talud típico	13
Fig. 3-4: Ejemplos de elementos artificiales	16
Fig. 3-5: Secciones y dimensiones de un rompeolas con sobrepaso cero o moderado.	19
Fig. 3-6: Valores de permeabilidad según Van der Meer (1988a).....	37
Fig. 3-7: Sección activa expuesta al daño.	39
Fig. 3-8: Vista en planta de un rompeolas tipo y sus divisiones.	41
Fig. 3-9: Definición del sector de estabilidad crítica.	42
Fig. 4-1: Mapa conceptual de la metodología de trabajo.	48
Fig. 4-2: Esquema de parámetros considerados.	49
Fig. 4-3: Dimensiones de un camión estándar.....	53
Fig. 4-4: Diseño base para sensibilización de escenarios.....	54
Fig. 5-1: Número de ola (N_z) para las localidades de estudio.....	58
Fig. 5-2: Análisis del peralte del oleaje por localidad.	59
Fig. 5-3: Análisis del peralte del oleaje incluyendo todas las zonas de estudio.....	60
Fig. 5-4: Comparación de formulaciones del "Grupo 1" analizadas en diferentes taludes.....	61
Fig. 5-5: Ecuaciones del "Grupo 1" analizadas en diferentes taludes	63
Fig. 5-6: Evaluación de la variación $K^*f(\alpha)$ para el "Grupo 1"	65
Fig. 5-7: Gráfica particular de las fórmulas de Iribarren (1938) y Svee (1965)	65
Fig. 5-8: Variación de fórmulas del "Grupo 2" según talud (izq.) y función α (der.)	67
Fig. 5-9: Variación de fórmulas del "Grupo 3" según talud (izq.) y función α (der.)	68
Fig. 5-10: Comportamiento de la fórmula de Koev para una profundidad de 5[m]	69
Fig. 5-11: Comportamiento de la fórmula de Larras para una profundidad de 5[m]	70
Fig. 5-12: Evaluación de la variación $K^*f(\alpha)$ para el "Grupo 4"	72
Fig. 5-13: Fórmula de Losada & Giménez-Curto para una profundidad de 5[m]	72
Fig. 5-14: Comparación de formulaciones del "Grupo 4" para una profundidad de 5 [m]	73
Fig. 5-15: Comportamiento de la fórmula de Koev para una profundidad de 10[m]	74
Fig. 5-16: Comportamiento de la fórmula de Larras para una profundidad de 10[m]	74
Fig. 5-17: Fórmula de Losada & Giménez-Curto para una profundidad de 10 [m]	75
Fig. 5-18: Análisis del factor exponencial en la ecuación de Losada & Giménez-Curto	76
Fig. 5-19: Comparación de formulaciones del "Grupo 4" para una profundidad de 10[m]	76
Fig. 5-20: Comportamiento de la fórmula de Koev para una profundidad de 15[m]	77
Fig. 5-21: Comportamiento de la fórmula de Larras para una profundidad de 15[m]	78
Fig. 5-22: Fórmula de Losada & Giménez-Curto para una profundidad de 15 [m]	78
Fig. 5-23: Formulación de Losada & Giménez-Curto para diferentes taludes	79
Fig. 5-24: Comparación de formulaciones del "Grupo 4" para una profundidad de 15 [m]	80
Fig. 5-25: Comparación de taludes contemplando daño inicial en el rompeolas.	81
Fig. 5-26: Comparación de taludes contemplando daño intermedio en el rompeolas.	83
Fig. 5-27: Evaluación de distintos taludes con respecto a un número de ola igual a 6000.	84
Fig. 5-28: Evaluación de distintos taludes con respecto a un número de ola igual a 7000.	85
Fig. 5-29: Evaluación de distintos taludes con respecto a un número de ola igual a 7500.	85
Fig. 5-30: Evaluación de distintos taludes con respecto a un número de ola igual a 10000.	85
Fig. 5-31: Comparación VdM AS (1988a) para diferentes cotangentes con $N_z=6000$	86
Fig. 5-32: Evaluación de la variación $K^*f(\alpha)$ para fórmula Van der Meer (1988a)	87
Fig. 5-33: Evaluación de la variación $K^*f(\alpha)$ para fórmula de Van Gent (2003)	88

Fig. 5-34: Ecuaciones del "Grupo 6" analizadas en diferentes taludes.	89
Fig. 5-35: Evaluación de la variación $K^*f(\alpha)$ para el "Grupo 6"	90
Fig. 5-36: Comparación de las fórmulas analizadas desde el "Grupo 1 al 6" ($\cot\alpha=1.5$)	92
Fig. 5-37: Comparación de las fórmulas analizadas desde el "Grupo 1 al 6" ($\cot\alpha=2.0$)	93
Fig. 5-38: Comparación de las fórmulas analizadas desde el "Grupo 1 al 6" ($\cot\alpha=2.5$)	94
Fig. 5-39: Comparación de las fórmulas analizadas desde el "Grupo 1 al 6" ($\cot\alpha=3.0$)	95
Fig. 5-40: Variación de periodo para la fórmula de Larras (1952)	97
Fig. 5-41: Variación de periodo para la fórmula de Losada & Giménez-Curto (1979)	97
Fig. 5-42: Variación de periodo para la fórmula de Koev (1992)	98
Fig. 5-43: Variación de periodo para la fórmula de VdM AP (1988a)	98
Fig. 5-44: Variación de periodo para la fórmula de VdM AS (1988a)	99
Fig. 5-45: Variación de periodo para la fórmula de Vidal (1999)	99
Fig. 5-46: Pesos de roca en el estudio de Valparaíso - Alternativa 1	102
Fig. 5-47: Pesos de roca en el estudio de Valparaíso - Alternativa 2	103
Fig. 5-48: Pesos de roca en el estudio de Trocadero	105
Fig. 5-49: Pesos de roca en el estudio de Paraíso	107
Fig. 5-50: Pesos de roca en el estudio de El Laucho	109
Fig. 5-51: Pesos de roca en el estudio de El Salitre – Alternativa 1	111
Fig. 5-52: Pesos de roca en el estudio de El Salitre – Alternativa 2	112
Fig. 5-53: Pesos de roca en el estudio Tocopilla	114

RESUMEN

En este estudio se desarrolla una investigación cuyo objetivo es realizar un análisis comparativo de formulaciones para el diseño de diques en talud. Se recopiló literatura especializada para identificar la mayor cantidad de ecuaciones, y con éstas se efectuaron análisis de sensibilidad que permitieron obtener los pesos de las rocas. Se observó el comportamiento de los resultados y se eligieron las fórmulas más relevantes según el autor suscrito.

Una vez hecha la selección, se contrastaron los datos hallados, con los extraídos de seis estudios ejecutados por el Instituto Nacional de Hidráulica (en adelante INH), éstos comprueban la estabilidad de la estructura a través de ensayos, tanto bidimensionales como tridimensionales. Los resultados encontrados fueron disímiles en relación a los entregados por el INH, lo que dio pie para generar interrogantes e intentar dilucidar estas desigualdades.

Al alcanzar el fin del estudio, fue imposible dar por terminado el análisis, debido a los parámetros que no se vieron representados por un ajuste certero de las ecuaciones de diseño existentes. Es por lo anterior que se recomienda enérgicamente un ensayo de laboratorio para la concepción de una fórmula de origen nacional que contemple las características adecuadas para las condiciones que se presentan en Chile.