



Facultad de Ingeniería

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

Alternativas de anclaje para embarcaciones en la Bahía de
Hanga Roa, para mitigar la destrucción de los arrecifes de
coral

Pamela Carolina Averill Astroza

MAYO 2018

ALTERNATIVAS DE ANCLAJE DE EMBARCACIONES EN LA BAHÍA DE HANGA
ROA, CON EL FIN DE MITIGAR LA DESTRUCCIÓN DE LOS ARRECIFES DE
CORAL

PAMELA CAROLINA AVERILL ASTROZA

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

PATRICIO WINCKLER G.

Profesor guía

MAURICIO REYES G.

Profesor sub-guía

FRANCISCO MOLTENI P.

Revisor N°3

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados 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.

Pamela Averill

Alumno Memorista

Patricio Winckler

Profesor Guía

AGRADECIMIENTOS

No podría haber terminado este trabajo sin la ayuda de grandes personas. Comenzaré por la gente que me acompañó durante todo el proceso de la carrera. Gracias a los profesores los cuales confiaron en mis capacidades, sobre todo mi profesor guía Patricio Winckler que a pesar de que me encontraba lejos en el período de hacer la tesis me apoyó y ayudó en el desarrollo de ésta. Gracias a mis compañeros que fueron el pilar fundamental en el período académico, gran grupo y grandes amigos Vicente Flores, Sebastián Silva y a mis queridas “Cotitas” Javiera Mora, Constanza Flores y Jair Vidal. Los quiero mucho y siempre estarán presentes.

Agradecer también a mi lugar de trabajo en Isla de Pascua. ‘Orca, Centro de Buceo’ por comprender y dar los permisos necesarios para finalizar este proceso, y en especial a Angélica Abarca que contribuyó con una gran ayudita.

Quiero agradecer a la Armada de Chile de Isla de Pascua, por brindar apoyo en la campaña de los derivadores reiteradas veces y siempre presentando una buena disposición.

Un abrazo especial a mi compañero Victor Icka, que durante todo el período de desarrollo de la tesis brindó su apoyo incondicional. También a mi familia Rapa Nui, a mi querida tía Hapa Tepano y mi hermana Serafina Moulton siempre ahí presentes, las quiero mucho. También a Mahina Pakarati gran amiga que contribuyó con sus conocimientos en algunos aspectos de la tesis.

Finalmente gracias a mis padres y hermanos por confiar en mis capacidades y nunca dudar que lo lograría, los amo mucho.

¡A todos Ustedes gracias infinitas!

CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN.....	15
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO	17
3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	17
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	17
3.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA ESPECÍFICA DE ESTUDIO	19
3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA COSTA ENTRE HANGA ROA Y PUNTA COOK.....	20
3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS CORALES DE ISLA DE PASCUA.....	21
4 CARACTERIZACIÓN DE DEMANDA DE ATRAQUE	23
4.1 DEMANDA HISTÓRICA DE LA BAHÍA	23
4.2 LÍMITE DEL SECTOR PARA REALIZAR LOS ANCLAJES	24
5 ESTUDIO DE CONDICIONANTES NATURALES.....	25
5.1 MAREAS Y CORRIENTES.....	25
5.1.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS RELACIÓN MAREA CORRIENTE	25
5.1.2 METODOLOGÍA CAMPAÑA DE CORRIENTES.....	26
5.1.3 RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE CORRIENTES	28
5.2 OLEAJE	31
5.2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL OLEAJE	31
5.2.2 METODOLOGÍA EN LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE OLEAJE	32
5.2.3 RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE OLEAJE	37
6 ALTERNATIVAS DE ANCLAJE EXISTENTES EN EL MUNDO.....	40
7 DISEÑO ESTRUCTURAL.....	43
7.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	43
7.1.1 NAVE DE DISEÑO	43
7.1.2 ESFUERZOS SOBRE LA NAVE DE DISEÑO	43
7.1.3 ALTERNATIVAS DE ANCLAJE A TRAVÉS DE CATENARIAS	50
7.1.4 ALTERNATIVA N°3 “PILOTE DE HORMIGÓN ARMADO”	64

7.2 RESULTADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL.....	69
7.2.1 ESFUERZOS SOBRE LA NAVE DE DISEÑO	69
7.2.2 ALTERNATIVAS DE ANCLAJE A TRAVÉS DE CATENARIAS	70
7.2.3 ALTERNATIVA N°3 “PILOTE DE HORMIGÓN ARMADO”	78
8 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	80
8.1 ALTERNATIVAS DE ANCLAJE A TRAVÉS DE CATENARIAS.....	80
8.1.1 COSTO DE LA BOYA.....	80
8.1.2 GRILLETES Y CADENAS DE ANCLAJE	80
8.1.3 MUERTO DE HORMIGÓN	80
8.1.4 COSTOS TOTALES ALTERNATIVA DE ANCLAJE A TRAVÉS DE CATENARIAS CON MUERTO DE HORMIGÓN.....	81
8.1.5 COSTOS TOTALES ALTERNATIVA DE ANCLAJE A TRAVÉS DE CATENARIAS CON SIMENTACIÓN PROFUNDA (PILOTE).....	81
8.2 ALTERNATIVA DE ANCLAJE A TRAVÉS DE PILOTE DE HORMIGÓN ARMADO	82
9 MATRIZ DE MULTICRITERIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVA	83
10 SUGERENCIA PARA EL FUTURO	86
11 ALCANCES Y LIMITACIONES	92
11.1 CORROSIÓN, DESGASTE DE CADENAS Y GRILLETES	92
11.1.1 CORROSIÓN.....	92
11.1.2 DESGASTE	92
12 CONCLUSIONES	93
13 REFERENCIAS	95
14 ANEXOS.....	97
14.1 OPINIÓN DE LA COMUNIDAD RESPECTO A LA PROBLEMÁTICA	97
14.1.1 METODOLOGÍA	97
14.1.2 RESULTADOS.....	97
14.2 CONDICIONANTES NATURALES.....	99
14.2.1 RELACIÓN MAREA CORRIENTE	99
14.2.2 CAMPAÑA DERIVADORES	100
14.3 NODOS DE EXTRACCIÓN DATOS DE OLEAJE	111
14.3.1 BATIMETRÍA ATLAS DE OLEAJE.....	111
14.4 RESULTADOS CLIMA MEDIO DE OLEAJE	112

14.5 NAVE DE DISEÑO	115
14.6 RESULTADOS CLIMA EXTREMO DE OLEAJE	116
14.7 ESFUERZOS SOBRE LA NAVE DE DISEÑO	118
14.8 DISEÑO DE ANCLAJE A TRAVÉS DE CATENARIAS	119
14.8.1 TREN DE FONDEO	119
14.8.2 DISEÑO DE CADENAS	120
14.8.3 DISEÑO MUERTO DE HORMIGÓN	122
14.8.4 DISEÑO DEL PILOTE DE CIMENTACIÓN	122
14.9 DISEÑO PILOTE DE HORMIGÓN ARMADO	123
14.9.1 FUERZAS HORIZONTALES SOMETIDAS EN EL PILOTE	123
14.9.2 ESTIMACIÓN DE LA LONGITUD DEL PILOTE	124
14.10 MATRIZ MULTICRITERIO	126

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Ubicación de la zona de estudio	17
Ilustración 2: Anclaje sobre el arrecife de coral	18
Ilustración 3: Yates anclados sobre el arrecife	18
Ilustración 4: Acceso a la caleta de pescadores	18
Ilustración 5: Imagen aérea de Isla de Pascua	19
Ilustración 6: Tramo entre Punta Cook y Hanga Roa	20
Ilustración 7: Caleta de Pescadores	21
Ilustración 8: Coral Nui Nui	21
Ilustración 9: Mapa de los sectores más característicos de Isla de Pascua	22
Ilustración 10: Coral Pocillopora damicornis	22
Ilustración 11: Coral Porites lobata	22
Ilustración 12: Límites y coordenadas de la zona por el tipo de fondo	24
Ilustración 13: Derivador tipo a utilizar	26
Ilustración 14: GPS Garmin utilizado en las mediciones	27
Ilustración 15: Punto de lanzamiento de derivadores	27
Ilustración 16: Comparación fotográfica de los derivadores en los distintos estados de marea	30
Ilustración 17: Anclaje tipo P	40
Ilustración 18: Anclaje tipo S	40
Ilustración 19: Sistema HILTY para roca	41
Ilustración 20: Instalación anclajes ecológicos	41
Ilustración 21: Sistema ecológico tipo elipse	42

Ilustración 22: Embarcación típica de llegada a Isla de Pascua	43
Ilustración 23: Esfuerzos resultantes de la presión de viento sobre la nave	45
Ilustración 24: Esfuerzos resultantes de la presión de corriente sobre la nave	46
Ilustración 25: Esfuerzos resultantes de la fricción por corriente sobre la nave	47
Ilustración 26: Esfuerzos resultantes debido al oleaje sobre la nave (1).	48
Ilustración 27: Esfuerzos resultantes debido al oleaje sobre la nave (2).	49
Ilustración 28: Diagrama de cuerpo libre en superficie	52
Ilustración 29: Cimentación vertical.....	55
Ilustración 30: sistema múltiple de catenarias	58
Ilustración 31: Tipos de cadenas	59
Ilustración 32: Boya Balizamar B1250M.....	61
Ilustración 33: Grillete para el amarre de la catenaria	62
Ilustración 34: Área mínima de refuerzo en el pilote de HA.....	65
Ilustración 35: Esquema anclaje básico de embarcaciones con muerto de hormigón (vista frontal)	71
Ilustración 36: Esquema anclaje básico de embarcaciones con pilote (vista frontal).....	73
Ilustración 37: Esquema multi-anclaje de embarcaciones con muertos de hormigón.....	75
Ilustración 38: Esquema multi-anclaje de embarcaciones con pilotes	77
Ilustración 39: Esquema pilote de hormigón armado	79
Ilustración 40: Caletas y muelles de Rapa Nui.....	86
Ilustración 41: Vista en planta de la Caleta Vinapu	87
Ilustración 42: Vista en planta y fotografías de la Caleta Vaihu	88
Ilustración 43: Caleta de Hanga Nui.....	89
Ilustración 44: Caleta de Hanga Ho'onu	90
Ilustración 45: Muelle de Anakena	91
Ilustración 46: Condición de marea en Cuadratura	99
Ilustración 47: Trayectoria derivadores en cuadratura llenante	102
Ilustración 48: Trayectoria derivadores en cuadratura vaciante	104
Ilustración 49: Trayectoria derivadores en sicigia llenante	107
Ilustración 50: Trayectoria derivadores en sicigia vaciante	109
Ilustración 51: Fotografías campaña de corrientes.....	110
Ilustración 52: Nodos de extracción datos de oleaje	111
Ilustración 53: Batimetría de Isla de Pascua	111
Ilustración 54: Rosas de oleaje nodos 1,2 y 3.....	113
Ilustración 55: Rosas de oleaje nodos 4 y 5.....	114
Ilustración 56: Comparación de rosas de oleaje en cada nodo	114
Ilustración 57: Partes de una embarcación	115
Ilustración 58: Tipo de Fondeo Intermedio	119
Ilustración 59: Tipo de fondeo con amarres flojos	119
Ilustración 60: Variación por efecto de las fuerzas en pilotes rígidos	123
Ilustración 61: Variación por efecto de las fuerzas en pilotes elásticos	123
Ilustración 62: Pilote de punta.....	124

Ilustración 63: Pilote en capa de suelo duro.....	125
Ilustración 64: Pilote de fricción	126

Índice de tablas

Tabla 1: Densidad Poblacional de los arrecifes de Coral.	22
Tabla 2: Coordenadas Límites de los bancos de arena.....	24
Tabla 3: Nivel de marea en los horarios de medición en cuadratura	28
Tabla 4: Cuadro resumen resultados en condición de marea en cuadratura.....	28
Tabla 5: Nivel de marea en los horarios de medición en sicigia	29
Tabla 6: Cuadro resumen resultados en condición de marea en sicigia.....	29
Tabla 7: Nodos de extracción parámetros de oleaje	32
Tabla 8: Funciones de distribución de probabilidad para el análisis extremal	35
Tabla 9: Resumen clima extremo de oleaje	39
Tabla 10: Valores de <i>Hs</i> propuestos por la ROM.....	49
Tabla 11: Resultados de esfuerzos sobre la nave de diseño de eslora 6 [m].	69
Tabla 12: Resultados de esfuerzos sobre la nave de diseño de eslora 15 [m].	69
Tabla 13: Resultados anclaje básico de embarcaciones.....	70
Tabla 14: Resultados de anclaje básico a través de Pilote de acero para una eslora de 15 [m]	72
Tabla 15: Resultados de anclaje básico a través de Pilotes de acero para una eslora de 6 [m]	72
Tabla 16: Resultado sistema de catenarias multianclaje.....	74
Tabla 17: Resultados del sistema de multianclaje a través de Pilote de acero para una eslora de 15 [m]	76
Tabla 18: Resultados del sistema de multianclaje a través de Pilote de acero para una eslora de 6 [m]	76
Tabla 19: Resultados verificación por corte	78
Tabla 20: Fuerzas horizontales y momento máximo	78
Tabla 21: Capacidad del pilote.....	79
Tabla 22: Costo de las boyas con traslado desde España a Puerto San Antonio	80
Tabla 23: Costo de la boya considerando el traslado a Isla de Pascua.....	80
Tabla 24: Costos totales de alternativas a través de catenarias con muerto de hormigón 81	
Tabla 25: Cotizaciones Pilote de hormigón armado	82
Tabla 26: Matriz comparativa de variables (CIR)	83
Tabla 27: Matriz comparativa evaluación económica	84
Tabla 28: Matriz comparativa complejidad constructiva	84
Tabla 29: Matriz comparativo en cuanto a los Materiales.....	85
Tabla 30: Cuadratura llenante derivador naranja	100
Tabla 31: Cuadratura llenante derivador verde	100
Tabla 32: Cuadratura llenante derivador amarillo.....	101
Tabla 33: Cuadratura llenante derivador azul	101
Tabla 34: Cuadratura vaciante derivador naranja	102
Tabla 35: Cuadratura vaciante derivador verde	103
Tabla 36: Cuadratura vaciante derivador amarillo.....	103

Tabla 37: Cuadratura vaciante derivador azul.....	104
Tabla 38: Sicigia llenante derivador naranja	105
Tabla 39: Sicigia llenante derivador verde	105
Tabla 40: Sicigia llenante derivador amarillo	106
Tabla 41: Sicigia llenante derivador azul.....	106
Tabla 42: Sicigia vaciante derivador naranja.....	107
Tabla 43: Sicigia vaciante derivador verde.....	108
Tabla 44: Sicigia vaciante derivador amarillo	108
Tabla 45: Sicigia vaciante derivador azul	109
Tabla 46: Distribución de frecuencias de alturas Hs y dirección del oleaje (Nodo 1).....	112
Tabla 47: Distribución de frecuencias de alturas Hs y dirección del oleaje (Nodo 2).....	112
Tabla 48: Distribución de frecuencias de alturas Hs y dirección del oleaje (Nodo 3).....	112
Tabla 49: Distribución de frecuencias de alturas Hs y dirección del oleaje (Nodo 4).....	112
Tabla 50: Distribución de frecuencias de alturas Hs y dirección del oleaje (Nodo 5).....	113
Tabla 51: Dimensiones nave de diseño	115
Tabla 52 : Alturas medias de la superficie de la nave de diseño	115
Tabla 53: Diseño de cadena con concreto.....	121
Tabla 54: Diseño de cadena sin concreto	121
Tabla 55: Denominaciones del cemento Portland.....	122
Tabla 56: Valores de Ku y δ	122
Tabla 57: Escala de Saaty, matriz-multicriterio	126

Índice de gráficos

Gráfico 1: Cantidad de embarcaciones por países que atracan en la bahía.....	23
Gráfico 2: Modelación con el programa SWAN representada a través de Matlab.	32
Gráfico 3: Superficie de Fondo de Isla de Pascua	33
Gráfico 4: Alturas sobre el umbral.....	34
Gráfico 5: Rosa de dirección y altura del oleaje (Nodo 3)	37
Gráfico 6: Histograma de Alturas Hs en el nodo 3	38
Gráfico 7: Histograma de períodos en el nodo 3.....	39
Gráfico 8: Aplicación de las propiedades de la catenaria	56
Gráfico 9: Porcentaje de personas encuestadas que posee o no conocimiento sobre el tema	97
Gráfico 10: Porcentaje de personas encuestadas que no les es indiferente el tema de la destrucción debido a las anclas.	98
Gráfico 11: Porcentaje de personas encuestadas que está de acuerdo con la implementación de un sistema de anclaje.....	98
Gráfico 12: Línea de tendencia Distribución Petruskas en relación Weibull	116
Gráfico 13: Línea de tendencia Distribución Goda en relación Weibull	117
Gráfico 14: Línea de tendencia Distribución Gringorten en relación Gumbel	117

Gráfico 15: Factor de forma	118
Gráfico 16: Coeficiente de flotación	118
Gráfico 17: Coeficiente de profundidad	118

RESUMEN

Esta investigación busca dar a conocer la destrucción de los arrecifes de coral en la Bahía de Hanga Roa, en Isla de Pascua, debido al excesivo anclaje de embarcaciones especialmente yates y veleros. En base a esto, se propone una solución, que consiste en un sistema de anclaje fijo para así mitigar el deterioro del arrecife debido a las anclas. Para hacer posible lo explicado se realizaron varios estudios los cuales se comentan a continuación.

En primera instancia se analizó la correntimetría del sector con el fin de saber si las corrientes son causadas principalmente por las mareas o el oleaje. Para realizar dicho estudio fue necesario el uso de derivadores los cuales fueron monitoreados a través de un bote y GPS en los diferentes estados de marea (cuadratura y sicigia).

Posteriormente se estudiaron los datos de oleaje otorgados a través del 'Atlas de Oleaje' de la Universidad de Valparaíso (Beya, 2016) y se complementaron con las cartas náuticas del SHOA y modelaciones realizadas con el programa SWAN.

A partir del estudio de las condicionantes naturales se analizan distintas alternativas de diseño de anclajes de embarcaciones, con el fin de obtener la mejor solución que se ajuste a las condiciones de la Bahía de Hanga Roa.

SUMMARY

This investigation shows the destruction of coral reef in Hang Roa Bay, Easter Island, due to the excessive anchorage of sailboats and yachts on the coral reef. A solution is proposed, based on this, it consists of the usage of a fixed anchorage system for boats to mitigate the deterioration of the reef. To make this possible, various studies were done, which will be reviewed below.

On a first instance, the current velocity of the sector was measured to know if the currents are caused mainly by the tide or by waves. To realize this study, the use of a derivator, was necessary, which were monitored through a boat and GPS on the different phases of the tide (Square and sicigia).

Posterior to this, the wave data was studied, which was provided by the 'Atlas de Oleaje' from Universidad de Valparaíso (Beya, 2016), and were complemented with nautic cards from SHOA and modelazation realized by the software SWAN.

Subsequently from this study of the natural conditions, different alternative desings, the main purpose of these procedures is to obtain a better solution that fits the conditions of Hanga Roa Bay.