



FACULTAD de INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

## **Utilización de dragas tipo cortador – succión en faenas portuarias y su factibilidad en el Puerto de San Antonio**

**SEBASTIÁN IGNACIO CONTRERAS RÍOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

PROFESORES GUÍA:

SR. MAURICIO REYES GALLARDO

SR. SEBASTIÁN RAYO VILLANUEVA

OCTUBRE DE 2012

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA**

**SANTIAGO**

---

**“Utilización de dragas tipo cortador – succión en faenas Portuarias y su factibilidad en el Puerto de San Antonio”**

**Sebastián Ignacio Contreras Ríos**

COMISIÓN REVISORA

CALIFICACIONES

NOTA FIRMA

SR. MAURICIO REYES GALLARDO

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

SR. FELIPE CASELLI BENAVENTE

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

SR. SEBASTIAN RAYO VILLANUEVA

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL OCEÁNICO**

SANTIAGO, CHILE

2012

## 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.*

## DEDICATORIA

*A mis padres Carlos y Pilar, por su amor y apoyo incondicional.  
A mi hermano Daniel.  
Y a mi polola Daniela.*

## AGRADECIMIENTOS

*Deseo agradecer a mis viejos y a mi hermano, por darme la oportunidad de estudiar (más de una vez).*

*A Daniela por su amor, apoyo y motivación constante, especialmente en este proceso de titulación.*

*A mis amigos Rodrigo y Eduardo, por las horas de clases, estudio y carrete. Donde forjamos amistades que se, perdurarán por toda la vida.*

*A Tomás, Jorge, Andy y a todos los del grupo “San Martes”.*

*Al Sr. Juan Rayo, Gerente Técnico de JRI Ingeniería; y al Sr. Hugo Andrade, Gerente General de Dragados Sudamérica, por permitirme ocupar datos e información fundamentales para el desarrollo de este trabajo.*

*A Sebastian Rayo, por su dedicación, preocupación y buena onda a la distancia para el desarrollo de esta memoria de título.*

*Finalmente, quiero agradecer a todos quienes me ayudaron y apoyaron a lo largo de mi vida universitaria; particularmente a los profesores Felipe Caselli y Mauricio Reyes por su disposición y rigurosidad para guiar y corregir este trabajo, al Pato Winckler, a Ernesto Gómez, a Viviana Barile, a Jorge Rojas, y a todos los que lamentablemente no recuerdo en este momento...*

*Gracias!!!*

## INDICE

<b>1. INTRODUCCION .....</b>	<b>2</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
<b>3. ALCANCES .....</b>	<b>5</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
4.1 TIPOS DE DRAGA.....	8
4.1.1 <i>Dragas Mecánicas</i> .....	8
4.1.1.1 <i>Draga Clamshell</i> .....	8
4.1.1.2 <i>Draga Tipo Retroexcavadora</i> .....	10
4.1.2 <i>Dragas Hidráulicas</i> .....	13
4.1.2.1 <i>Draga por Inyección de Agua</i> .....	13
4.1.2.2 <i>Draga de succión simple</i> .....	13
4.1.2.3 <i>Draga de succión por arrastre o dragas “hopper”</i> .....	13
4.1.3 <i>Dragas Combinadas</i> .....	15
4.1.3.1 <i>Draga de succión con Cortador</i> .....	15
4.1.3.2 <i>Draga de succión con Cortador Vertical</i> .....	26
4.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA.....	27
4.2.1 <i>TRANSPORTE POR TUBERÍAS EN PRESIÓN</i> .....	27
4.2.1.1 <i>Balance de energía</i> .....	27
4.2.1.2 <i>Pérdidas de carga por fricción (<math>h_f</math>)</i> .....	28
4.2.1.3 <i>Pérdidas de carga singulares (<math>h_s</math>)</i> .....	29
4.2.1.4 <i>Dimensionamiento conceptual para cajones de bombeo</i> .....	30
4.3 <i>TRANSPORTE HIDRÁULICO DE SÓLIDOS</i> .....	31
4.3.1 <i>Definición de términos y relaciones básicas</i> .....	31
4.3.1.1 <i>Vehículo, Carga y Pulpa</i> .....	31
4.3.1.2 <i>Granulometría</i> .....	31
4.3.1.3 <i>Diagrama Reológico</i> .....	31
4.3.1.4 <i>Escurrimiento como suspensión homogénea</i> .....	32
4.3.1.5 <i>Escurrimiento como flujo heterogéneo</i> .....	32

4.3.1.6	<i>Escurrecimiento con lecho móvil</i> .....	32
4.3.1.7	<i>Escurrecimiento con lecho fijo</i> .....	33
4.3.1.8	<i>Concentración en Volumen <math>C_v</math></i> .....	33
4.3.1.9	<i>Concentración en peso <math>C_p</math></i> .....	33
4.3.1.10	<i>Densidad de la pulpa <math>\rho_p</math></i> .....	33
4.3.1.11	<i>Flujo volumétrico de Pulpa QP</i> .....	34
4.3.2	<i>Transporte de sólidos por tuberías en presión</i> .....	34
4.3.2.1	<i>Velocidad del flujo (<math>V_F</math>)</i> .....	34
4.3.2.2	<i>Velocidad límite de depósito (<math>V_L</math>)</i> .....	34
4.3.2.3	<i>Velocidad de transición (<math>V_T</math>)</i> .....	35
4.3.2.4	<i>Pérdidas de carga por fricción en pulpas</i> .....	36
4.3.2.5	<i>Pérdidas de carga por fricción en pulpas heterogéneas</i> .....	38
4.3.3	<i>Sistemas de bombeo</i> .....	40
4.3.3.1	<i>Altura neta positiva de aspiración (NPSH)</i> .....	40
4.3.3.2	<i>Conversión altura de pulpa a columna de agua</i> .....	41
4.3.3.3	<i>Potencia consumida</i> .....	42
4.4	<i>MODELOS DE TRANSPORTE HIDRÁULICO DE SÓLIDOS</i> .....	43
4.4.1	<i>Modelos matemáticos de pérdidas friccionales</i> .....	44
4.4.1.1	<i>Modelo de Slatter</i> .....	45
4.4.2	<i>Modelos matemáticos de velocidad límite</i> .....	46
4.4.2.1	<i>Modelo de Wilson &amp; Thomas (1985 - 1987)</i> .....	46
4.4.2.2	<i>Modelo de Durand-Condolios (1952)</i> .....	48
4.4.2.3	<i>Modelo de Durand – Condolios modificado por Charles (1970)</i> .....	49
4.4.2.4	<i>Modelo de Zandi y Govatos (1967)</i> .....	49
4.4.3	<i>Velocidad límite en tuberías</i> .....	50
4.4.3.1	<i>Modelo de Durand (1953)</i> .....	50
4.4.3.2	<i>Modelo de Durand modificado por Rayo (1977)</i> .....	50
4.4.3.3	<i>Modelo de Wasp</i> .....	50
4.4.3.4	<i>Modelo de Wasp modificado</i> .....	51
4.4.3.5	<i>Modelo de Gillies (1993)</i> .....	51
4.4.3.6	<i>Modelo de Gillies et al (1999)</i> .....	52
4.5	<i>TEORÍA FUNDAMENTAL DE MECÁNICA DE SUELOS PARA EL DRAGADO</i> .....	53
4.5.1	<i>Parámetros de la mecánica de suelos</i> .....	53
4.5.1.1	<i>La textura del suelo</i> .....	53

4.5.1.2	<i>Distribución granulométrica</i> .....	54
4.5.1.3	<i>Límites de Atterberg</i> .....	56
4.5.1.4	<i>Relación masa – volumen</i> .....	57
4.5.1.5	<i>Gravedad específica</i> .....	57
4.5.1.6	<i>Densidad</i> .....	58
4.5.1.7	<i>Densidad relativa</i> .....	58
4.5.1.8	<i>Porosidad</i> .....	59
4.5.1.9	<i>Razón de vacíos</i> .....	59
4.5.1.10	<i>Permeabilidad</i> .....	60
4.5.1.11	<i>Cohesión y adhesión</i> .....	61
4.5.1.12	<i>Criterio de falla</i> .....	61
4.5.1.13	<i>Ley de Darcy</i> .....	61
<b>5.</b>	<b>ANTECEDENTES GENERALES</b> .....	<b>63</b>
5.1	DESCRIPCIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO.....	63
5.2	BATIMETRÍA.....	64
5.3	MECÁNICA DE SUELOS.....	64
5.3.1	<i>Zona Sitio 1</i> .....	65
5.3.2	<i>Zona Sector Costanera</i> .....	66
5.4	CLIMA OPERACIONAL.....	67
5.4.1	<i>Oleaje</i> .....	67
5.4.1.1	<i>Clima de oleaje medio</i> .....	67
5.4.1.2	<i>Clima de oleaje extremo</i> .....	68
5.4.2	<i>Mareas</i> .....	69
5.4.3	<i>Viento</i> .....	69
5.4.4	<i>Corrientes</i> .....	70
5.5	DRAGA DE CORTE-SUCCIÓN.....	71
5.5.1	<i>Draga de corte-succión tipo Marlin</i> .....	71
5.5.2	<i>Características del equipo</i> .....	73
5.5.3	<i>Profundidad de dragado</i> .....	73
5.5.4	<i>Capacidad y carguío de combustible</i> .....	73
5.5.5	<i>Características de la bomba de succión</i> .....	73
5.5.6	<i>Sistemas de levante</i> .....	74
5.5.6.1	<i>Huinche de movimiento lateral (swing)</i> .....	74
5.5.6.2	<i>Huinche de la escala (soporte cortador)</i> .....	74
5.5.6.3	<i>Huinche de popa</i> .....	74



<b>6. METODOLOGÍA</b> .....	<b>75</b>
6.1 GENERALIDADES .....	75
6.1.1 <i>Datos de procesos</i> .....	76
6.1.2 <i>Metodología de dragado</i> .....	79
6.1.2.1 <i>Avance de la draga</i> .....	79
6.1.2.2 <i>Interferencia con las operaciones portuarias</i> .....	79
6.1.2.3 <i>Cuidados con el suelo</i> .....	79
6.2 EVALUACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS .....	81
6.2.1 <i>Pérdidas friccionales</i> .....	82
6.2.2 <i>Velocidad límite</i> .....	83
6.3 MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DEL MATERIAL REMOVIDO .....	84
6.3.1 <i>Barcazas de apoyo</i> .....	84
6.3.1.1 <i>Caso 1:Draga Marlin con una barcaza de apoyo</i> .....	84
6.3.1.2 <i>Caso 2: Draga Marlin con dos barcazas de apoyo</i> .....	85
6.3.2 <i>caso 3: Descarga en emisario</i> .....	87
6.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS ESTUDIADAS .....	92
6.4.1 <i>CAPEX – Barcazas de apoyo</i> .....	92
6.4.2 <i>CAPEX – Descarga en emisario</i> .....	94
<b>7. RESULTADOS</b> .....	<b>95</b>
<b>8. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>98</b>
<b>9. ANEXOS</b> .....	<b>102</b>
9.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	103
9.2 ESQUEMAS DE DESCARGA EN EMISARIO .....	105
9.3 SUPUESTOS PARA LA ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS .....	106
9.3.1 <i>Para las barcazas de apoyo:</i> .....	106
9.3.2 <i>Para la descarga en emisario:</i> .....	106
9.4 CÁLCULO .....	107
9.5 RECOPIACIÓN DE DRAGADOS EN CHILE .....	110
<b>10. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>112</b>

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1-1: Planta EPSA, zonas de dragado .....	3
Figura 4-1: Draga tipo Clamshell .....	9
Figura 4-2: Operación típica de draga retroexcavadora.....	10
Figura 4-3: Características generales draga retroexcavadora .....	12
Figura 4-4: Draga de succión por arrastre (Trailing Suction Hopper Dredge) .....	15
Figura 4-5: elementos principales de la draga de corte .....	16
Figura 4-6: Distancia entre pilote y cortador .....	17
Figura 4-7: Longitud y ancho del movimiento lateral.....	17
Figura 4-8: Planta y elevación de limitación del ancho a dragar por dimensiones del pontón.....	18
Figura 4-9: Tipos de cabezales de corte de draga.....	19
Figura 4-10: Cortador con hojas lisas .....	20
Figura 4-11: Cortador con hojas con forma de sierra.....	20
Figura 4-12: Ejemplos de dientes de cabezal.....	21
Figura 4-13: operación de una draga anclada a pilotes .....	22
Figura 4-14: sistema de avance “spud carriage”.....	23
Figura 4-15: Spud carriage - planta .....	23
Figura 4-16: Disposición de amarras tipo “christmas tree”.....	24
Figura 4-17: Cortador vertical.....	26
Figura 4-18: Gráfico de Mc Elvain y Cave .....	35
Figura 4-19: Reograma .....	46
Figura 4-20: Triángulo de texturas del suelo según el Servicio Agrícola de Estados Unidos .....	54
Figura 4-21: Curva granulométrica .....	55
Figura 4-22: Límites de Atterberg .....	56
Figura 4-23: Relación masa – volumen .....	57
Figura 4-24: Diagrama de convención de unidades de la Ley de Darcy .....	62
Figura 5-1: Batimetría del Puerto de San Antonio .....	64
Figura 5-2: Puntos de sondaje de la Zona Sitio 1 .....	65
Figura 5-3: Estratigrafía Sector Costanera .....	66

Figura 5-4: Ubicación de sondajes en Zona sector Costanera .....	67
Figura 5-5: Ubicación de sondajes en Zona sector Costanera .....	67
Figura 5-6: Rosa de oleaje .....	68
Figura 5-7: Dragas tipo Marlin .....	71
Figura 5-8: Planta y sección draga "Nodie" .....	72
Figura 6-1: Tubería de HDPE con flotadores.....	88
Figura 6-2: Emisario submarino de ESVAL con lastres .....	88
Figura 6-3: Curva de operación de la bomba de descarga desde cajón de bombeo.....	90
Figura 6-4: Perfil Hidráulico de descarga en emisario para material removido .....	91
Figura 9-1: Esquema general de dragado Sector Costanera .....	105
Figura 9-2: Esquema general de dragado Sitio 1 .....	105

## INDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Factores límite.....	12
Tabla 4-2: Tipos de sedimento y restricciones para el dragado de dragas de succión por arrastre.....	14
Tabla 4-3: Factores límite.....	25
Tabla 4-4: Coeficientes de pérdidas singulares.....	29
Tabla 4-5: Presión de vapor en función de la temperatura.....	41
Tabla 4-6: Clasificación del suelo según el Servicio Agrícola de Estados Unidos.....	54
Tabla 4-7: Clasificación de suelos dependiendo del tamaño de la partícula, valores en $\mu\text{m}$ .....	55
Tabla 5-1: Composición estructural del puerto de San Antonio.....	63
Tabla 5-2: Alturas significativas asociadas a periodos de retorno.....	69
Tabla 6-1: Balance de materiales Zona Sitio 1.....	76
Tabla 6-2: Balance de materiales Zona Sector Costanera.....	77
Tabla 6-3: Coeficientes de pérdidas friccionales.....	82
Tabla 6-4: Pendientes de fricción.....	82
Tabla 6-5: Pérdidas singulares del sistema.....	82
Tabla 6-6: Velocidad de escurrimiento en la línea.....	83
Tabla 6-7: Resultados de modelos de velocidad límite.....	83
Tabla 6-8: Ciclo de dragado con una barcaza de apoyo.....	85
Tabla 6-9: Balance de materiales para ambos sitios.....	86
Tabla 6-10: Datos operacionales.....	89
Tabla 6-11: Características de la operación hidráulica.....	89
Tabla 6-12: Parámetros para la selección de la bomba en funcionamiento nominal.....	90
Tabla 6-13: Costos asociados al uso de una nave de apoyo.....	93
Tabla 6-14: Costos asociados al uso de dos naves de apoyo.....	93
Tabla 6-15: (Valores en USD).....	94
Tabla 6-16: (Valores en USD).....	94
Tabla 9-1: Datos generales de proceso del Sitio 1 con concentración en peso de 25 por ciento.....	103

Tabla 9-2: Datos generales de proceso del Sector Costanera con concentración en peso de 25 por ciento .....	103
Tabla 9-3: Datos generales de proceso del Sitio 1 con concentración en peso de 35 por ciento. ....	104
Tabla 9-4: Datos generales de proceso del Sector Costanera con concentración en peso de 35 por ciento .....	104

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento, denominado “Utilización de dragas tipo cortador – succión en faenas portuarias y su factibilidad en el Puerto de San Antonio”, tiene por objetivo evaluar la factibilidad técnica y económica de dragar los sectores Costanera y Sitio 1 del puerto de San Antonio con una draga tipo cortador – succión.

En este proyecto de título se realizan los cálculos necesarios para verificar si una draga de tipo corte – succión puede realizar la labor de dragado de 1 millón 500 mil metros cúbicos de sedimentos desde los sitios Costanera y Sitio 1. Además se lleva a cabo la comparación de distintas alternativas para desechar del material removido por el dragado. Éstas son el uso de barcazas de apoyo o el diseño de un emisario que descargue el material en el cañón que se encuentra aguas afuera de la dársena del puerto.

Tanto para las alternativas de barcazas de apoyo como la de instalar un emisario, se realizaron cálculos que permitieran estimar el tiempo de dragado y de desecho del material. Todo esto se hizo mediante formulaciones teóricas y empíricas de hidráulica, procesos físicos, mecánica de suelos y estimaciones económicas que permitieran determinar cuál es la mejor opción en términos de tiempo, capital de inversión y gastos operacionales asociados a la faena de dragado.

Al analizar y comparar las 3 alternativas se llegó a que el tiempo efectivo de dragado y desecho del material difiere drásticamente manteniendo todas las características operacionales de proceso constantes y variando el método de desecho; donde la mayor diferencia se produce entre la alternativa con una barcaza y la descarga en emisario, en ella la primera alternativa arroja tiempo de dragado y desecho de 27,75 meses, mientras que la última arroja un tiempo total de 10,45 meses.

Por lo tanto, se determinó que la mejor opción es la de diseñar e instalar un emisario submarino que permita desechar el material removido, ya que los costos y tiempo asociados a éste son menores que los asociados a las barcazas de apoyo.

Cabe destacar que para que esta alternativa tenga los mejores resultados posibles se debe cumplir con una filosofía operacional adecuada, compatible con los tiempos y operaciones las portuarias, propias del puerto de San Antonio.