

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Inventario de daños en la infraestructura portuaria de Puerto Limón
y propuesta de procedimientos constructivos para su reparación**

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Natalia Vindas Pérez

Director de Proyecto de Graduación:

Robert Anglin Fonseca

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Comité Asesor

Director de Proyecto de Graduación

Ing. Robert Anglin Fonseca M.Sc.

Robert Anglin Fonseca

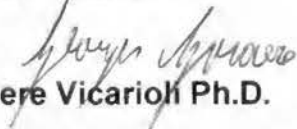
Asesor de Proyecto de Graduación

Ing. Carlos Camacho Soto M.Sc.



Asesor de Proyecto de Graduación

Ing. Georges Govaere Vicarioli Ph.D.



Graduando (a)

Natalia Vindas Pérez

Fecha: 2010, Enero, 20

El suscrito, **Natalia Vindas Pérez**, cédula 1-1223-888, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carne **A25555**, manifiesto que soy autora del Proyecto Final de Graduación **Inventario de daños en la infraestructura de Puerto Limón, y propuestas de procedimientos constructivos para su reparación**, bajo la Dirección del **Ing. Robert Anglin Fonseca**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Dedicatoria

Dedico este Trabajo de Graduación,

a mi mamá, Marisol,

por ser mi mayor ejemplo de fortaleza, alegría y perseverancia;

a mi papá, Emmanuel,

por mandarme su bendición todos los días desde el cielo;

y a mi tío Alvaro,

por ser parte fundamental de mi vida y ayudarme a crecer como persona.

Agradecimientos

En primer lugar le doy gracias a Dios por brindarme la oportunidad de estudiar y concluir una carrera tan dura y hermosa como la Ingeniería Civil.

Luego quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo y paciencia durante mis años universitarios y durante la elaboración de este proyecto de graduación.

Agradezco también a mi Director de Proyecto, el Ing. Robert Anglin, por su gran disposición para ayudarme, y a los asesores el Ing. Carlos Camacho y el Ing. Geoges Goevares por su apoyo y recomendaciones.

De igual manera agradezco a los ingenieros de Japdeva por su amabilidad para atender todas mis consultas.

Vindas Pérez, Natalia

Inventario de daños en la infraestructura portuaria de Puerto Limón y propuesta de procedimientos constructivos para su reparación

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San Jose, Costa Rica:

N. Vindas P., 2010

VIII, 80, [0]h; ils. col. – 33 refs.

RESUMEN

Los puertos conforman un conjunto de obras, instalaciones y servicios que al encontrarse en las condiciones óptimas, proporcionan un espacio seguro y tranquilo para la estancia de las embarcaciones, mientras se realizan las operaciones de carga y descarga de las mercancías y el tránsito de viajeros. Estas operaciones, la acción del medio ambiente y situaciones eventuales como desastres naturales o choque de embarcaciones pueden ocasionar daños severos a la infraestructura del puerto, afectando total o parcialmente los servicios que este brinda.

Este trabajo se compone principalmente de 3 partes: la clasificación de los posibles daños que se pueden encontrar en un puerto, el inventario de daños que se encontraron en Puerto Limón mediante inspección y consulta a los ingenieros de JAPDEVA y el conjunto de soluciones constructivas que se han utilizado anteriormente o que se encontraron por revisión bibliográfica y de internet, para reparar los daños enlistados en el inventario.

Se considera que la importancia de este proyecto estriba en que mantener un registro actualizado de los daños que ha sufrido la infraestructura portuaria de Puerto Limón permite identificar los factores que más daños ocasionan a la infraestructura y tomar las medidas preventivas necesarias con el fin de reducir la incidencia de daños. Por otro lado, el conjunto de soluciones constructivas propuestas en este trabajo pretende sentar una base para que se puedan tomar las medidas correctivas a tiempo y así disminuir la magnitud de los daños encontrados.

INVENTARIO DE DAÑOS EN INFRAESTRUCTURA PORTUARIA; PUERTO LIMÓN;
PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS PARA REPARACION DE DAÑOS EN
INFRAESTRUCTURA PORTUARIA

Ing. Robert Anglin Fonseca, M.Sc

Indice General

Contenido

1 INTRODUCCIÓN.....	12
2 GENERALIDADES SOBRE PUERTO LIMÓN.....	16
2.1 RESEÑA HISTÓRICA DE PUERTO LIMÓN.....	16
2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA DE PUERTO LIMÓN.....	19
2.2.1 Muelle Alemán	21
2.2.2 Muelle de Remolcadores	22
2.2.3 Muelle 70	23
2.2.4 Muelle para Cruceros	24
2.2.5 Rampas Ro/Ro.....	25
2.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	26
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS MAREAS.....	29
2.5 TIPO DE EMBARCACIÓN Y MODALIDAD DE CARGA PRESENTE EN PUERTO LIMÓN.....	33
3 AMENAZAS A LAS ESTRUCTURAS PORTUARIAS.....	37
3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SEGÚN SU UBICACIÓN Y CONDICIONES AGRESIVAS DEL MEDIO.....	37
3.1.1 Zona sumergida.....	38
3.1.2 Zona de marea.....	39
3.1.3 Zona de salpicaduras.....	39
3.1.4 Zona de ambiente marino.....	40
3.2 DAÑOS POR LA ACCIÓN DEL CLIMA Y ELEMENTOS MEDIOAMBIENTALES.....	40
3.2.1 Corrosión en estructuras de concreto reforzado expuestas al ambiente marino.....	41
3.2.2 Adherencias marinas.....	45
3.3 DAÑOS OCASIONADOS POR LA OPERACIÓN DEL PUERTO.....	46
3.4 DAÑOS POR CHOQUE DE EMBARCACIONES Y SISMOS.....	46
3.4.1 Choque de buques	47

<i>3.4.2 Sismo</i>	47
--------------------------	----

4 INVENTARIO DE DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA DE PUERTO LIMÓN.....49

4.1 MUELLES	50
<i>4.1.1 MUELLE 70</i>	50
<i>4.1.2 MUELLE DE CRUCEROS</i>	56
<i>4.1.3 MUELLE ALEMÁN</i>	61
<i>4.1.4 MUELLE DE REMOLCADORES</i>	62
<i>4.1.5 RAMPAS RO/RO</i>	63
4.2 PATIOS Y CAMINOS	64
4.3 ROMPEOLAS	64
4.4 INVENTARIO DE DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA DE PUERTO LIMÓN	65

COMO SE MENCIONÓ ANTERIORMENTE, ESTE INVENTARIO NO ES DEFINITIVO, E INCLUYE DATOS DE DAÑOS QUE YA SE HAN REPARADO COMO DATOS DE DAÑOS POR REPARAR PRÓXIMAMENTE. LOS DAÑOS ENLISTADOS DEL MUELLE 70 AÚN NO HAN SIDO REPARADOS, MIENTRAS QUE EL RESTO DE LOS DAÑOS INVENTARIADOS YA SE RESOLVIERON.....67

5 MÉTODOS CONSTRUCTIVOS RECOMENDADOS PARA LA REPARACIÓN DE LOS DAÑOS ENCONTRADOS EN LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA DE PUERTO LIMÓN.....68

5.1 ENCAMISADOS	72
<i>5.1.1 Encamisados de concreto en pilotes</i>	73
<i>5.1.2 Encamisados de fibra de vidrio en pilotes</i>	75
<i>5.1.3 Metalización</i>	76
5.2 PROTECCIÓN CATÓDICA EN PILOTES	77
5.3 REPARACIÓN DE PILOTES	79
5.4 SUSTITUCIÓN TOTAL DE PILOTES	80
5.5 REMOCIÓN DE ADHERENCIAS MARINAS DE PILOTES	82
5.6 REPARACIÓN DE VIGAS DEBIDO AL IMPACTO DE EMBARCACIONES	82
5.7 UTILIZACIÓN DE ÁNODOS DE SACRIFICIO EN EL CONCRETO	85
5.8 AUMENTO DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DE VIGAS	86

<u>5.9 INYECCIÓN Y RELLENO DE GRIETAS EN VIGAS Y LOSAS.....</u>	<u>87</u>
<u>5.10 RECONSTRUCCIÓN DE ÁREA AGRIETADA DE LOSAS.....</u>	<u>87</u>
<u>5.11 COLOCACIÓN DE RIELES EN SUPERFICIE DE CONCRETO DE</u> <u>RAMPAS RO/RO.....</u>	<u>88</u>
<u>5.12 REEMPLAZO DE DEFENSAS.....</u>	<u>89</u>
<u>5.13 REEMPLAZO DE LÁMINAS DE DEFENSAS.....</u>	<u>90</u>
<u>5.14 DRAGADO.....</u>	<u>91</u>
<u>5.15 RELLENO DE ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES.....</u>	<u>93</u>
<u>5.16 REMOCIÓN DE ADOQUINES DAÑADOS Y COLOCACIÓN DE</u> <u>NUEVOS ADOQUINES.....</u>	<u>93</u>
<u>5.17 FIJAR PARRILLAS A BASE SOPORTE.....</u>	<u>94</u>
<u>5.18 DESALINEAMIENTO DE RIELES DEBIDO A SISMOS.....</u>	<u>94</u>
<u>5.19 PROTECCIÓN DEL ROMPEOLAS.....</u>	<u>96</u>
<u>6 CONCLUSIONES.....</u>	<u>99</u>
<u>7 FUENTES CONSULTADAS.....</u>	<u>103</u>

Indice de Figuras

FIGURA 2.1 UBICACIÓN DE PUERTO LIMÓN.....	19
FIGURA 2.2 PLANO ESQUEMÁTICO DE PUERTO LIMÓN.....	21
FIGURA 2.3 MUELLE ALEMÁN.....	22
FIGURA 2.6 MUELLE 70.....	24
FIGURA 2.7 MUELLE DE CRUCEROS.....	24
FIGURA 2.8 RAMPA RO/RO EN MUELLE ALEMÁN.....	25
FIGURA 2.9 RAMPA RO/RO A LA PAR DE MUELLE DE CRUCEROS.....	25
FIGURA 3.1 ZONAS SEGÚN EXPOSICIÓN A LOS AGENTES AGRESIVOS DEL AMBIENTE MARINO	38
FIGURA 3.2. ESQUEMA DEL PROCESO DE CORROSIÓN.....	42
FIGURA 4.1 PILOTES DEL MUELLE 70.....	51
FIGURA 4.2 VIGAS DEL MUELLE 70.....	53
FIGURA 4.3 BARCO HUNDIDO DAÑANDO EL MUELLE 70.....	54
FIGURA 4.4 LOSA AGRIETADA DEL MUELLE 70.....	54

FIGURA 4.5 DEFENSA DAÑADA DEL MUELLE 70.....	55
FIGURA 4.6 PILOTE DAÑADO, SOSTENIDO POR LA GRÚA.....	56
FIGURA 4.7 GRIETA EN LOSA DE MUELLE DE CRUCEROS DEBIDO A COLISIÓN.....	58
FIGURA 4.8 DEFENSA DAÑADA DEL MUELLE DE CRUCEROS.....	60
FIGURA 4.9 MUELLE DE REMOLCADORES.....	62
FIGURA 4.10 DESGASTE DE RAMPA RO/RO.....	63
FIGURA 4.11 ADOQUINES QUEBRADOS EN PATIO DE PUERTO LIMÓN.....	64
FIGURA 4.12 ROMPEOLAS DE PUERTO LIMÓN.....	65
FIGURA 5.1 PROCESO DE ANÁLISIS Y CAUSAS DE REPARACIÓN EN OBRAS PORTUARIAS.....	69
FIGURA 5.2 ESTRUCTURA DE ACERO PARA RECUBRIMIENTO DE CONCRETO.....	73
FIGURA 5.3 FORMALETA PARA EL RECUBRIMIENTO DEL PILOTE.....	75
FIGURA 5.4 PROCESO DE ENCAPSULACIÓN AVANZADA DE PILOTES.....	77
FIGURA 5.5 PROTECCIÓN POR CORRIENTE IMPRESA Y GALVÁNICA.....	78
FIGURA 5.6 ÁNODO DE SACRIFICIO UTILIZADO EN MUELLE DE CRUCEROS.....	79
FIGURA 5.7 EXTRACCIÓN DE PILOTE DAÑADO.....	81
FIGURA 5.8 REMOCIÓN DE ELEMENTOS DAÑADOS DEL MUELLE DE CRUCEROS.....	83
FIGURA 5.9 DEMOLICIÓN DE ELEMENTOS DAÑADOS DEL MUELLE DE CRUCEROS.....	84
FIGURA 5.10 ENCOFRADO UTILIZADO EN REPARACIÓN DEL MUELLE DE CRUCEROS.....	84
FIGURA 5.11 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS ÁNODOS PUNTUALES.....	85
FIGURA 5.12 RIELES COLOCADOS EN RAMPA RO/RO, EN MUELLE DE CRUCEROS.....	89
FIGURA 5.13 REMOCIÓN DE DEFENSA EN EL MUELLE 70.....	90
FIGURA 5.14 DRAGADO DE MANTENIMIENTO DE PUERTO LIMÓN.....	92
FIGURA 5.15 PARRILLAS EMPERNADAS EN SUS EXTREMOS.....	94
FIGURA 5.16 SISTEMA DE RIEL DE GRÚA UTILIZADO EN EL MUELLE ALEMÁN.....	95
FIGURA 5.17 XBLOC.....	96
FIGURA 5.18 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE XBLOC.....	97

Indice de Cuadros

CUADRO 2.1 DISTRIBUCIÓN DEL COMERCIO POR PUERTOS.....	17
CUADRO 2.2. ALTURA DE MAREAS MENSUALES PARA EL AÑO 2007.....	31
CUADRO 2.4. TRÁFICO DE CARGA TOTAL EN TONELADAS MÉTRICAS (2007).....	34

CUADRO 2.5. TRÁFICO DE CARGA POR PRINCIPALES PRODUCTOS EN TONELADAS MÉTRICAS (2007).....	35
CUADRO 4.1 DAÑOS PRESENTES EN PILOTES DEL MUELLE 70.....	51
CUADRO 4.2 DAÑOS PRESENTES EN LAS VIGAS DEL MUELLE 70.....	52
CUADRO 4.3 INVENTARIO DE DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA DE PUERTO LIMÓN	66
CUADRO 5.1 RESUMEN DE ACCIONES DE REPARACIÓN DE DAÑOS EN PUERTO LIMÓN SEGÚN LAS DIFERENTES PARTES DE LAS INSTALACIONES ESTUDIADAS.....	71

1 INTRODUCCIÓN

Para un país con una ubicación geográfica tan privilegiada como Costa Rica, con costas tanto en el Pacífico como en el Atlántico, los puertos vienen a simbolizar la clave para mejorar la economía. El comercio exterior y el turismo pueden contribuir a aumentar el producto interno bruto (PIB) de gran manera si la infraestructura de los puertos del país se encuentra en las condiciones óptimas.

Según se establece en el documento “*Los Puertos de Costa Rica*”, elaborado por la (Aresep: 1999), en Puerto Limón atracaron un total de 1162 buques, de los cuales 1059 eran de carga y 67 eran cruceros. Se observa que este puerto fue el que más embarcaciones recibió, seguido por Puerto Moín con 1081 buques atracados en sus instalaciones. Este hecho subraya la importancia que tiene Puerto Limón para la economía nacional y la necesidad de que la infraestructura de este puerto se encuentre en las condiciones óptimas.

Los daños que se pueden presentar en la infraestructura portuaria tienen su origen en las condiciones agresivas del medio ambiente, la operación normal del puerto y eventos especiales como los desastres naturales y el choque de embarcaciones. Cuando la infraestructura portuaria no recibe el mantenimiento adecuado para corregir y/o prevenir los daños que van sucediendo, los elementos que componen el puerto ven reducida su vida útil y la capacidad del puerto para atender a las embarcaciones se ve reducida también, ya que las operaciones se deben realizar con mayor precaución debido a las

malas condiciones de la infraestructura y en ciertos casos se deben sacar de operación componentes del puerto.

De aquí nace la importancia de que Puerto Limón cuente con un inventario de daños y soluciones constructivas para las reparaciones, de la necesidad de que este puerto, el más importante del país, ofrezca unas instalaciones portuarias de la mejor calidad a la gran cantidad de embarcaciones que atracan en él.

La importancia de este trabajo estriba en que Puerto Limón debe contar con la infraestructura necesaria para atender la demanda comercial y turística del país y el hecho de contar con un inventario de daños en la infraestructura portuaria de Puerto Limón, el cual se continúe actualizando, permite visualizar los daños más comunes y tomar las medidas preventivas necesarias para evitarlos y contar con un puerto en las condiciones de infraestructura óptimas. Además, las propuestas constructivas para la reparación de dichos daños permiten sentar una base para una toma de decisiones más ágil en cuanto a las medidas correctivas de los daños.

Para trabajos de graduación futuros, relacionados con este tema, se pueden considerar los aspectos financieros y económicos de las propuestas constructivas, así como una actualización de los daños en la infraestructura.

OBJETIVOS

General

Se realizó un inventario de daños en la infraestructura portuaria de Puerto Limón y se plantearon procedimientos constructivos para subsanar los daños enlistados.

Específicos

- Se realizó una descripción general de la infraestructura portuaria de Puerto Limón, así como de sus características climáticas, tipo de embarcaciones y modalidad de carga que presenta.
- Se enlistaron los elementos que componen la infraestructura portuaria.
- Se describieron los daños que se presentan en la infraestructura portuaria debido a las condiciones ambientales, a las condiciones de operación el puerto y a eventos especiales.
- Se estudiaron los daños encontrados en la infraestructura portuaria de Puerto Limón.
- Se estudiaron los métodos constructivos aplicables para reparar cada daño encontrado en la infraestructura portuaria de Puerto Limón.

METODOLOGÍA

Este trabajo se realizó con base en la inspección visual de Puerto Limón, guiada por ingenieros de JAPDEVA, la revisión bibliográfica exhaustiva y la consulta a varios profesionales en ingeniería civil cuyos campos de experiencia están relacionados con las reparaciones rutinarias y eventuales en los puertos de Costa Rica.

El informe final se estructura de la siguiente forma: en el Capítulo 1 se establece la introducción, el problema, los objetivos, la metodología, los alcances y las limitaciones. En el Capítulo 2 se presentan generalidades sobre Puerto Limón, como una descripción general de su infraestructura, la caracterización climática, entre otros. En el Capítulo 3 se clasifican los daños que se pueden presentar en la infraestructura portuaria (por la acción del medio ambiente, operación del puerto y sucesos eventuales). En el Capítulo 4 se presenta el inventario de daños encontrados en Puerto Limón y finalmente en el Capítulo 5 se presentan los procedimientos constructivos propuestos para reparar los daños inventariados.

ALCANCES Y LIMITACIONES

- El estudio de los daños en la infraestructura portuaria de Puerto Limón incluye los daños encontrados por inspección al momento de realizar el proyecto, en las visitas realizadas al puerto, y los daños potenciales referidos por los ingenieros de JAPDEVA y considerados por la autora.
- El estudio de los daños de los pilotes de los diferentes muelles de Puerto Limón se realizó con fotografías y por referencia de los ingenieros de JAPDEVA, ya que no se realizaron inspecciones submarinas.
- Los procedimientos constructivos expuestos en este proyecto se establecen como una opción para reparar los daños encontrados, dejando abierta la posibilidad de que existan otros procedimientos aplicables a los mismos daños.
- Los costos de las reparaciones no se incluyen en el estudio, pues dependen de factores muy variables como la oferta y demanda de los materiales, las condiciones de ocupación del muelle que se vaya a reparar, el tipo de cambio del dólar con respecto al colón, la mano de obra disponible, entre otros.

2 GENERALIDADES SOBRE PUERTO LIMÓN

A pesar de que el descubrimiento del país se dio por medio de la costa Atlántica, fue hasta el siglo XIX que Limón se estableció como comarca independiente, cuando se habilitó Puerto Limón para el comercio y se inició la construcción del ferrocarril al Atlántico (www.japdeva.go.cr, consultado el 04/10/08).

De esta forma, el desarrollo de la Región Caribe responde a la necesidad de expansión económica y comercial del país, para lo cual se requiere una infraestructura adecuada que se adapte efectiva y eficientemente a dicha necesidad.

2.1 RESEÑA HISTÓRICA DE PUERTO LIMÓN

La provincia de Limón fue el punto por donde ingresaron Cristóbal Colón y los españoles durante la colonización en 1502. Los 212 kilómetros de costa en la región Atlántica representan aproximadamente el 15% del total de costas que posee Costa Rica frente a ambos océanos (Villegas, Chaves; 2002). En cuanto a su topografía, Limón presenta tanto zonas montañosas como planicies y llanuras. Esta provincia limita al norte con Nicaragua, al oeste con las provincias de Heredia, Cartago y San José, al suroeste con Puntarenas, al sureste con Panamá y al noreste con el Mar Caribe.

Durante el siglo XIX, el café fue el principal producto de exportación de Costa Rica, y el puerto de Puntarenas el de mayor movimiento comercial. Sin embargo, la exportación de café hacia Europa y Estados Unidos por la vía del Pacífico implicaba una larga trayectoria y altos costos de transporte.

Entonces, la construcción del ferrocarril al Atlántico en 1890, surgió como una solución a este problema, pocos años después de la entrada en funcionamiento de Puerto

Limón. Este último fue construido y administrado, al igual que los ferrocarriles de esa provincia, por la Northern Railways Co. En 1852 se habilitó el Puerto Limón para el comercio y en 1865 se declaró puerto principal de la República en la costa caribe.

Ya desde el año 1907, según se presenta en el Cuadro 2.1, Limón prevalece sobre Puntarenas, ya que por éste ingresaba y salía alrededor del 90% del comercio exterior, situación que se mantiene hasta la actualidad.

CUADRO 2.1 DISTRIBUCIÓN DEL COMERCIO POR PUERTOS

Año	Importación		Exportación	
	Puntarenas	Limón	Puntarenas	Limón
1883	35%	65%	68%	32%
1886	25%	75%	43%	57%
1907 en adelante	13%	87%	6%	94%

Fuente: Arrieta, Pérez, Wilshire. 2000

En el año 1968, la administración del ferrocarril y la del puerto pasaron a manos del Estado de Costa Rica. Actualmente, los puertos de la Región Atlántica (Complejo Portuario Limón – Moín) son administrados por la Junta de Administración Portuaria y de Desarrollo Económico de Vertiente Atlántica (JAPDEVA) creada en 1963. A través de estos puertos, actualmente se maneja aproximadamente el 80% de las importaciones y exportaciones del país.

El terremoto ocurrido el 22 de abril de 1991 significó para toda la provincia de Limón un duro golpe económico y social. Si bien la pérdida de vidas humanas no fue tan elevada (48 muertos y 651 heridos, según la Red Sismológica Nacional, en

[www.rsn.geologia.ucr.ac.cr/00%20Sismos%20hist%F3ricos/Limon%2022-04-](http://www.rsn.geologia.ucr.ac.cr/00%20Sismos%20hist%F3ricos/Limon%2022-04-1991.htm)

[1991.htm](http://www.rsn.geologia.ucr.ac.cr/00%20Sismos%20hist%F3ricos/Limon%2022-04-1991.htm)), las pérdidas económicas en infraestructura fueron altas. Muchos de los acueductos, carreteras, muelles y viviendas fueron destruidas y otras sufrieron daños severos. La producción agrícola también se vio afectada, pues muchos terrenos sufrieron deforestación masiva y deslizamientos y muchas comunidades productoras quedaron incomunicadas debido a la destrucción de la red vial. Por otro lado, la industria turística de Limón fue afectada, ya que el levantamiento costero, el depósito en gran escala de maderas en las playas y la dificultad de acceso por tierra durante meses redujo la afluencia de turistas a la costa Atlántica.

Específicamente, las pérdidas económicas en infraestructura portuaria llegaron a 1788 millones de colones. El levantamiento de la placa continental ocurrida en la zona portuaria tuvo como consecuencia que los puertos perdieran su profundidad original y que por lo tanto se requirieran obras de dragado. Además, se debía reparar edificios, pilotes, muelles y rehabilitar patios. (Lavell Thomas, Allan: 1992)

De esta manera se concluye que el funcionamiento óptimo de los puertos del Caribe se traduce en beneficios económicos primeramente para la sociedad de la Región Caribeña, y en general para toda la sociedad costarricense. Para que un puerto opere de manera óptima, es necesario que su infraestructura se encuentre en las mejores condiciones, y para esto se deben conocer las amenazas a las que se encuentran expuestas las instalaciones portuarias y los daños más frecuentes que sufren. En primera instancia se divide el área del puerto en zonas según se exposición a las condiciones agresivas del ambiente, pues los elementos que se encuentran en ciertas zonas son más vulnerables a daños como la corrosión.

Al contar con un inventario de daños en la infraestructura portuaria y conocer las soluciones constructivas aplicables a la reparación de los mismos, es posible establecer programas de mantenimiento preventivo y correctivo que permitan a las

instalaciones responder efectiva y eficientemente a las necesidades económicas y comerciales del país.

2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA DE PUERTO LIMÓN

El Complejo Portuario de Limón tiene una posición estratégica con relación a las rutas del transporte marítimo, pues se ubica en una posición intermedia entre Norte y Sudamérica, y a poca distancia del canal de Panamá.

El Complejo Portuario de Limón está conformado por 2 terminales portuarias:

1. Terminal Portuaria de Limón
2. Terminal Portuaria de Moín

Por tierra, estas terminales se encuentran a 7 km, y por mar a 7 millas náuticas.

Puerto Limón se localiza en el Mar Caribe, Océano Atlántico, a 83°, 03', 48" longitud oeste y 9°, 59', 30" latitud norte, como se muestra en la Figura 2.1. Se encuentra a una distancia de 160 kilómetros por carretera de la ciudad de San José.

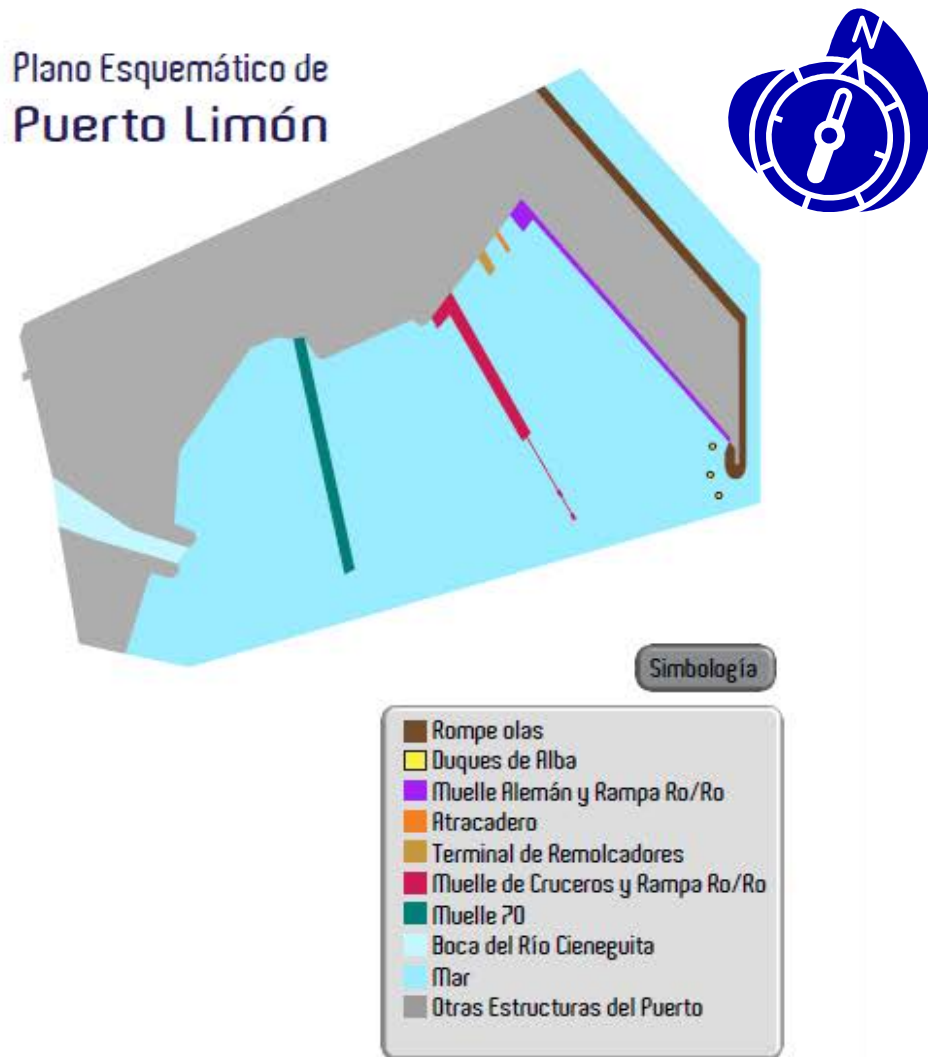
FIGURA 2.1 UBICACIÓN DE PUERTO LIMÓN



Fuente: <http://earth.google.es/> , accesado el 10/08/08

Actualmente, Puerto Limón cuenta con un rompeolas de 723 m de longitud, un canal de acceso con una profundidad de 11,5 m. Tiene un área de 27 Ha 1 665 m² y un perímetro de 4.8 km. En cuanto a los muelles, este puerto cuenta con 4 muelles: El Muelle Alemán o Terminal de Contenedores, el Muelle de Remolcadores, el Muelle de Cruceros y el Muelle 70. Además cuenta con 2 rampas para buques tipo roll on – roll off, conocidos como Ro/Ro. (Ver Plano Esquemático de Puerto Limón en la Figura 2.2).

FIGURA 2.2 PLANO ESQUEMÁTICO DE PUERTO LIMÓN



Fuente: La autora

2.2.1 Muelle Alemán

El Muelle Alemán, entró en operación en el año 1982. Consiste en un muelle de 450 metros de longitud, con capacidad para atender dos buques al mismo tiempo. El calado varía entre los nueve y diez metros de profundidad.

Cuenta además, con una explanada para contenedores con capacidad para almacenar 560 contenedores y una rampa para buques tipo Ro - Ro. El uso primordial de esta

instalación es el manejo de contenedores, sin embargo también es utilizada como terminal de carga general, vehículos, cruceros turísticos y otros. (Ver Figura 2.3)

La parte este del Muelle Alemán la compone el rompeolas, el cual tiene una longitud de 723 metros y es de dolos de una sola línea.

FIGURA 2.3 MUELLE ALEMÁN

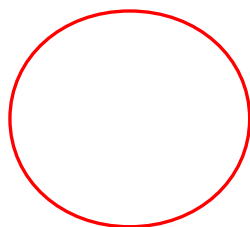
Fuente: La autora



2.2.2 Muelle de Remolcadores

Este muelle fue construido en el 2008 y tiene una altura aproximada de 3,5 m. Se muestra en las Figuras 2.4 y 2.5.

FIGURA 2.4 MUELLE DE REMOLCADORES





Fuente: La autora

FIGURA 2.5 MUELLE DE REMOLCADORES



FUENTE: JAPDEVA

2.2.3 Muelle 70

El Muelle 70 fue construido en el año 1970, con carácter de estructura temporal, por lo que en el año 1982 se reestructuró (Alvarez Molina; 1985). Es un muelle tipo espigón que tiene una longitud de 325 metros y 17 metros de ancho, con una capacidad inicial

de atraque para tres buques, pero debido al escaso calado y la presencia de un buque hundido en el costado oeste, solo se dispone de un atraque. Actualmente, no se utiliza de forma regular, ya que presenta un alto grado de deterioro y no existen planes de continuar restaurándolo. La Figura 2.6 es una fotografía aérea de este muelle.

FIGURA 2.6 MUELLE 70



Fuente: La autora

2.2.4 Muelle para Cruceros

El Muelle para Cruceros (ver Figura 2.7) fue puesto en operación en el 2002. Su estructura, según se informa en la página oficial de Japdeva, www.japdeva.go.cr, tiene una longitud de 217 m y un ancho de 16 m. En el extremo de su estructura, tiene una punta con pasarelas metálicas y duques. Su profundidad es de diez metros.

FIGURA 2.7



MUELLE DE CRUCEROS

Fuente: La autora

2.2.5 Rampas Ro/Ro

En Puerto Limón existen 2 rampas para el atraque de buques con la modalidad roll on / roll off. Una de ellas se encuentra en el Muelle Alemán (ver Figura 2.8) y la otra contiguo al Muelle de Cruceros (ver Figura 2.9).

FIGURA 2.8 RAMPA Ro/RO EN MUELLE ALEMÁN

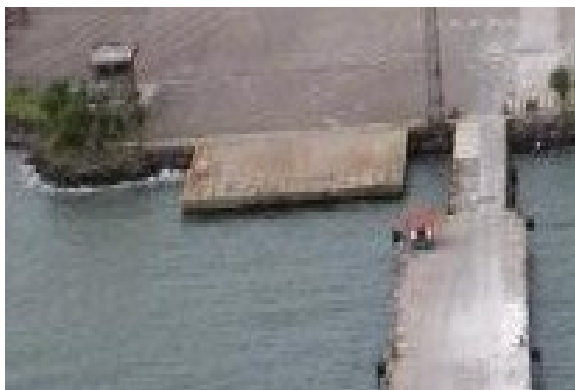


Fuente: La autora

FIGURA 2.9 RAMPA Ro/RO A LA PAR DE MUELLE DE CRUCEROS



Fuente: La autora



En lo que se refiere a otras facilidades, Puerto Limón cuenta con una serie de edificaciones entre las que se encuentran: un edificio administrativo, un edificio multiuso, el edificio de la terminal de contenedores, un edificio de uso social (soda-comedor), 2 edificios de documentación, un almacén de suministros, un taller mecánico, un edificio de gerencia portuaria y diversos patios de almacenamiento. Para efectos del presente proyecto, no se estudiaron los daños ni las soluciones constructivas en éstas estructuras.

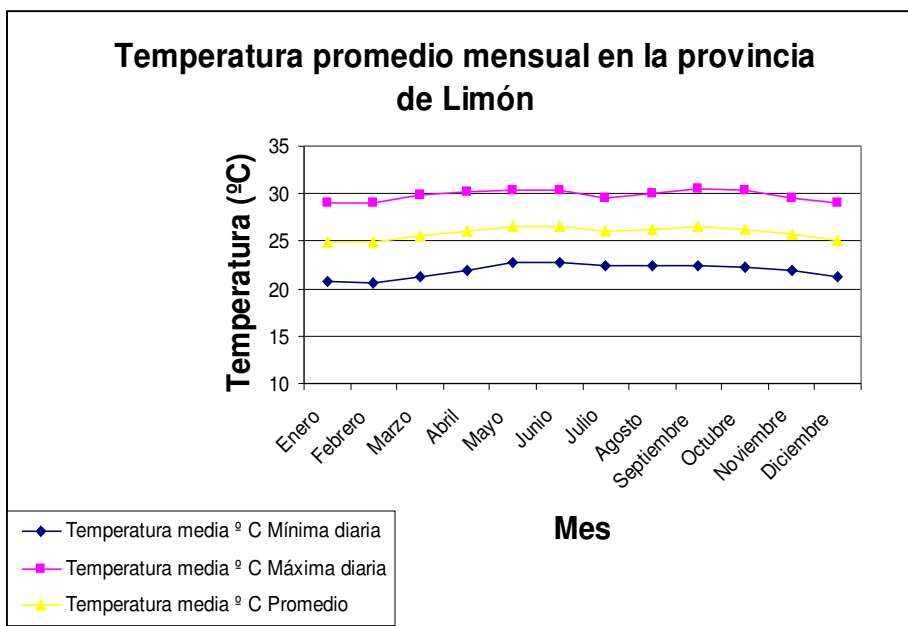
2.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

La caracterización climática de un puerto es de gran importancia pues todas las actividades que en él se realizan pueden verse afectadas por factores climáticos como la temperatura, la precipitación, la humedad relativa y las horas de sol. Varios de los daños en la infraestructura portuaria que se identificaron en este proyecto tienen su origen en la corrosión producto de la mezcla de altas temperaturas, altos niveles de precipitación, de salinidad y alta humedad relativa que caracteriza a la provincia de Limón. Además, ciertos procedimientos constructivos tienen rangos de funcionalidad limitados por factores climáticos. Por otro lado, el rendimiento de los operarios también está sometido a las condiciones climáticas.

Puerto Limón tiene un clima caliente y húmedo, típico de las costas, con una temperatura anual promedio de 25.5° C. En el Gráfico 2.1 se muestra la variación de la temperatura promedio mensual, presentándose las mayores temperaturas en los meses de abril a junio, septiembre y octubre.

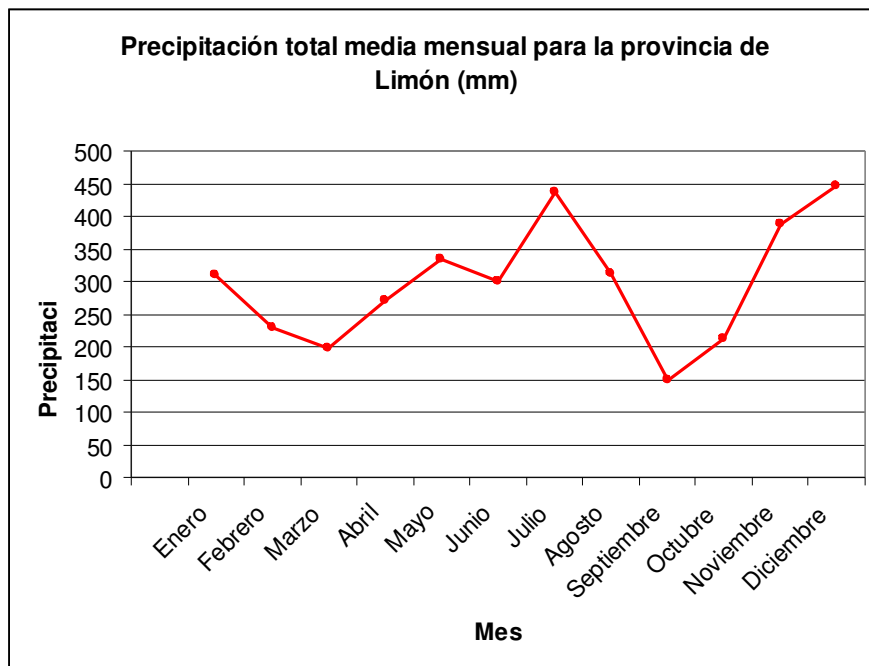
En el Gráfico 2.2 se muestra la precipitación total media mensual para la provincia de Limón, donde se observa que los meses que presentan mayor precipitación son los de julio, agosto, noviembre y diciembre. En el Gráfico 2.3 muestra el promedio de días con lluvia en la provincia de Limón, coincidiendo las meses de mayor cantidad de días con lluvia con los meses de mayor precipitación total media.

GRÁFICO 2.1 TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL EN LA PROVINCIA DE LIMÓN



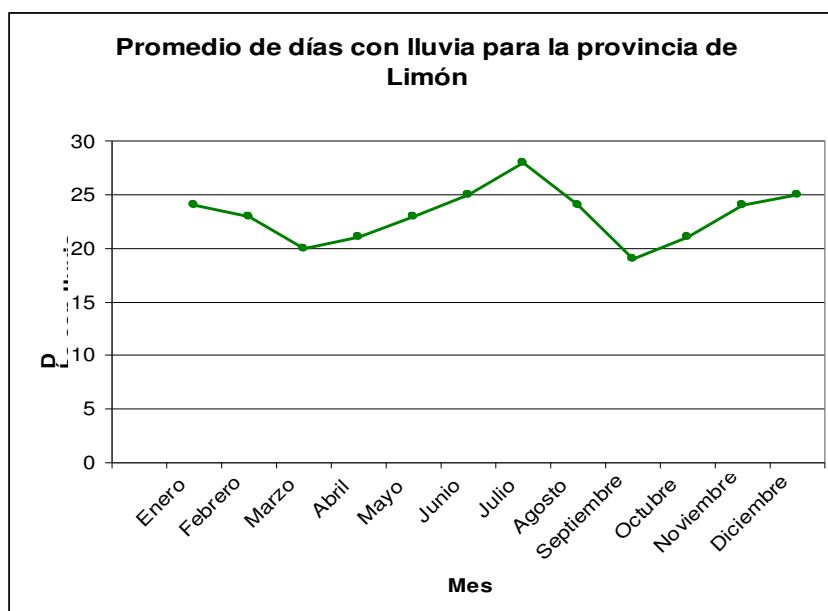
Datos tomados del IMN, estación 3, Limón, gráfico elaborado por la autora

GRÁFICO 2.2 PRECIPITACIÓN TOTAL MEDIA MENSUAL PARA LA PROVINCIA DE LIMÓN



Datos tomados del IMN, estación 3, Limón, gráfico elaborado por la autora

GRÁFICO 2.3 PROMEDIO DE DÍAS CON LLUVIA EN LA PROVINCIA DE LIMÓN



Datos tomados del IMN, estación 3, Limón, gráfico elaborado por la autora

La humedad relativa en Limón presenta un valor medio del 84% durante los meses de marzo y abril, y entre 86% y 88% el resto del año. Esta zona es la más húmeda del país pues la humedad entra constantemente con el viento alisio desde el Mar Caribe.

Según el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), consultado en la página de Internet www.imn.ac.cr/educacion/climacr/vertiente_caribe.html, durante todo el año, el comportamiento del viento está caracterizado por dos sistemas: en la noche, la brisa de tierra a mar tiene direcciones Sur-Oeste y Oeste, y en el día, tiene componentes Norte, Noreste y Este con velocidades promedio próximas a los 12 km/h.

Las horas de sol efectivas en la provincia de Limón fluctúan entre las 4 y 6 horas como promedio durante los días de enero y hasta mayo, mientras que el mes de julio presenta la mayor cobertura nubosa (IMN:2009)

2.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS MAREAS

El oleaje es una de las condiciones ambientales que más afecta las operaciones en la costa, pues hace que las embarcaciones se desplacen, se balanceen, se inclinen y oscilen. Además, durante el proceso constructivo puede afectar significativamente el cronograma de actividades si no se considera al programar.

Las olas son [ondas](#) que se desplazan por la superficie de las masas de agua y son puestas en marcha por el viento. El fenómeno es provocado debido a que la fricción entre el viento y la superficie del agua produce un cierto arrastre, dando lugar primero a la formación de rizaduras de pocos centímetros de altura en la superficie del agua. Cuando la superficie pierde su lisura, el efecto de fricción se intensifica y las pequeñas rizaduras iniciales dan paso a olas de gravedad.

La altura de las olas depende de tres parámetros del viento: su velocidad, su persistencia en el tiempo y la estabilidad de su dirección. Entre mayor sea la altura de

las olas, mayor es la cantidad de energía que pueden extraer del viento. De esta forma, los mayores oleajes se producen en presencia de las condiciones meteorológicas que favorezcan las características mencionadas.

Una vez puestas en marcha, las olas que se desplazan sobre aguas profundas disipan su energía muy lentamente, de forma que alcanzan regiones muy lejanas del lugar donde se formaron. Así pueden observarse oleajes de gran altura en ausencia de viento.

Las olas disipan su energía de distintas maneras, entre ellas:

- La energía puede convertirse en una corriente superficial, un desplazamiento en masa de un gran volumen de agua hasta una profundidad considerable.
- Puede disiparse por fricción con el aire, en una inversión del fenómeno que puso en marcha las olas.
- Puede disiparse si una velocidad excesiva del viento provoca la ruptura de las crestas.
- Termina por disiparse por interacción con la corteza sólida, cuando el fondo es poco profundo o cuando finalmente las olas se estrellan con la costa.

Cuando las olas llegan a la costa sufren unas últimas transformaciones antes de disiparse:

- Se encrespan si encuentran un obstáculo marcado en la franja costera. Dependiendo del obstáculo, su forma, tamaño, y la fuerza y velocidad de las olas, pueden adquirir diferentes expresiones de tamaño, velocidad, forma o movimiento.
- Se da el efecto de [resaca](#) del agua o de contraola, el cual sucede cuando las olas llegan hasta la orilla de tierra firme o la orografía costera y rebotan o se deslizan de nuevo hacia el mar, creando olas en dirección opuesta al golpe de mar. Generalmente se disipan o estrellan con otras olas en algunos metros.

Para llevar a cabo este proyecto, fue importante conocer el oleaje, con el fin de determinar acertadamente la protección que se debe brindar a los pilotes y otros elementos, y la ubicación de los puntos más susceptibles a corrosión, además de ser necesaria para determinar los turnos de trabajo y los procedimientos constructivos a implementar, pues éstos dependen en gran medida de las mareas.

Mediante el programa obtenido de la página de Internet www.wxtide32.com, consultado el 20 de enero de 2008, se obtuvo la altura promedio durante la marea alta y baja para cada uno de los meses del año 2007, tal como se muestra en el Cuadro 2.2. En este cuadro se observa que la altura promedio tiene una variación de menos de 0,6 m, lo cual no es muy relevante para las obras de construcción y actividades que se realizan en un puerto.

CUADRO 2.2. ALTURA DE MAREAS MENSUALES PARA EL AÑO 2007

Mes	Marea (ft)		Fluctuación (ft)	Fluctuación (m)
	Baja	Alta		
Enero	-0,3	1,5	1,8	0,55
Febrero	-0,4	1,4	1,8	0,55
Marzo	-0,5	1,3	1,8	0,55
Abril	-0,6	1,3	1,9	0,58
Mayo	-0,6	1,4	2	0,61
Junio	-0,5	1,5	2	0,61
Julio	-0,4	1,5	1,9	0,58
Agosto	-0,3	1,5	1,8	0,55
Septiembre	-0,3	1,5	1,8	0,55
Octubre	-0,4	1,6	2	0,61

Noviembre	-0,4	1,6	2	0,61
Diciembre	-0,4	1,6	2	0,61

Datos obtenidos con el programa de la página de Internet www.wxtide32.com, y elaborado por la autora

2.5 TIPO DE EMBARCACIÓN Y MODALIDAD DE CARGA PRESENTE EN PUERTO LIMÓN

El tipo de embarcación y la modalidad de carga presente en un puerto son aspectos que se deben considerar en el diseño de la infraestructura portuaria, o en su defecto, la infraestructura portuaria puede limitar el tipo de embarcación y la modalidad de carga que llega al puerto. Embarcaciones con mayores capacidades de carga requieren mayores calados en los muelles. Cada modalidad de carga requiere de características especiales en los muelles, por ejemplo, grúas para cargar y descargar contenedores, entre otras. Los tipos de embarcaciones que atracan en un puerto se pueden dividir en las siguientes categorías: de carga general, porta-contenedores, transbordadores, cruceros turísticos, graneleros y barcos tanque.

Los barcos de carga general cuentan con 5 bodegas generalmente y requieren un calado de 10 m. Los porta-contenedores nacieron de la necesidad de aumentar los rendimientos en el manejo de carga en los puertos. Los de primera generación requieren calados de 8 m, mientras que los de segunda y tercera generación requieren calados de 11,5 m y 12,5 m, respectivamente. Los porta-contenedores de segunda y tercera generación que son de mayor capacidad y velocidad que los de primera, no pueden atracar en Puerto Limón debido al calado, dejando a este puerto en una condición de rezago frente a otros puertos del mundo. Los barcos transbordadores son los que permiten el trasbordo de la carga por rodadura, por medio de rampas con que cuentan las naves en la proa, la popa o los costados. En Costa Rica se les conoce como barcos de carga roll on / roll off. Los cruceros turísticos que llegan a la costa caribeña costarricense lo hacen en Puerto Limón y se ven limitados a un calado de 9 m. Los barcos graneleros se clasifican en mineraleros y para graneles agrícolas. Los de mayor capacidad requieren instalaciones especializadas para sus operaciones en el puerto, sin embargo, se pueden utilizar terminales de carga general. Los barcos tanque son los que transportan productos petroleros y gas licuado.

Según el Anuario Estadístico 2007 de Japdeva, para el año mencionado, en el Complejo Portuario Limón y Moín se atendió en total 2.495 naves, de las cuales 2.374 naves fueron mercantes y 121 cruceros con 198.770 pasajeros, los cuales atracan a lo largo de todo el año. De las naves mercantes, las modalidades convencionales, roll on roll off, cruceros y otros, fueron atendidas principalmente en Puerto Limón (ver Cuadro 2.4). Por su parte, Puerto Moín maneja una mayor cantidad de carga en toneladas métricas en las modalidades de frigorífico, granel, petrolero y gasero. En cuanto a la modalidad de porta contenedor, ambos puertos del complejo Limón Moín manejan una carga similar.

CUADRO 2.4. TRÁFICO DE CARGA TOTAL EN TONELADAS MÉTRICAS (2007)

Modalidad	Limón	Moín	Total
Convencional	318.726	205.794	524.520
Frigorífico	64.854	2.869.083	2.933.937
Porta contenedor	1.881.526	1.904.537	3.786.063
Roll on / roll off	388.041	14.865	402.906
Granel sólido	9.086	22.652	31.738
Granel líquido	5.498	454.914	460.412
Petrolero	0	1.062.586	1.062.586
Gasero	0	717.296	717.296
Otro	1.118	0	1.118
<i>General</i>	<i>2.668.849</i>	<i>7.251.727</i>	<i>9.920.576</i>

Fuente: JAPDEVA, Anuario Estadístico 20007

Con respecto a los principales productos que se embarcan y desembarcan en Puerto Limón, en el Cuadro 2.5 se muestra estos datos. El hierro, los productos químicos, los fertilizantes, los vehículos y repuestos y otros son los principales productos que se desembarcan en Puerto Limón. El café, las verduras y otros son los principales productos que se embarcan en dicho puerto.

En este primer capítulo se presentaron generalidades de Puerto Limón, entre ellas una breve reseña histórica y ubicación geográfica del puerto y sus muelles, la

caracterización climática y de las mareas presente en la provincia de Limón y para finalizar, se describieron brevemente el tipo de embarcación y la modalidad de carga que se maneja en Puerto Limón. En el Capítulo 3 se describen los elementos que componen un puerto, las zonas que determinan el grado de exposición de estas estructuras y las diferentes amenazas a las que las estructuras se ven expuestas.

CUADRO 2.5. TRÁFICO DE CARGA POR PRINCIPALES PRODUCTOS EN TONELADAS MÉTRICAS
(2007)

Producto	Limón	Moín	Total
<i>Desembarque</i>			
Papel y cartón	247.473	334.102	581.575
Hierro	171.819	37.536	209.355
Textiles	11.451	30.958	42.409
Productos químicos	163.380	92.884	256.264
Resinas	33.096	94.209	127.305
Fertilizantes	30.501	22.168	52.669
Petróleo y derivados	19.690	2.218.652	2.238.342
Vehículos y repuestos	58.549	40.270	98.819
Otros	751.271	292.719	1.043.990
<i>Embarque</i>			
Banano	32.567	2.256.864	2.289.431
Café	59.418	13.575	72.993
Verduras	94.713	40.381	135.094
Frutas frescas	150.543	1.355.150	1.505.693
Plantas y hortalizas	18.880	70.864	89.744
Textiles	11.664	34.280	45.944

Otros	813.875	317.115	1.130.990
-------	---------	---------	-----------

Fuente: JAPDEVA, Anuario Estadístico 20007

3 AMENAZAS A LAS ESTRUCTURAS PORTUARIAS

Una instalación portuaria es el lugar donde se realiza la interacción que se lleva a cabo cuando una embarcación es intervenida directa o indirectamente por actividades como movimiento de personas, mercancías o provisión de servicios portuarios a la embarcación o desde ésta. Las instalaciones que conforman un puerto son: muelles, edificios, bodegas, caminos, patios y vías férreas. Además se deben considerar en el estudio las obras de abrigo, como los rompeolas, que aseguran una estancia segura y cómoda para las embarcaciones, ante las acciones del mar. Este proyecto se limitó al estudio y clasificación de los daños en los muelles, caminos, patios y rompeolas.

Para poder clasificar los daños que se presentan en la infraestructura portuaria es necesario distinguir primero las diferentes zonas que determinan el grado de exposición de las estructuras a la agresividad del ambiente.

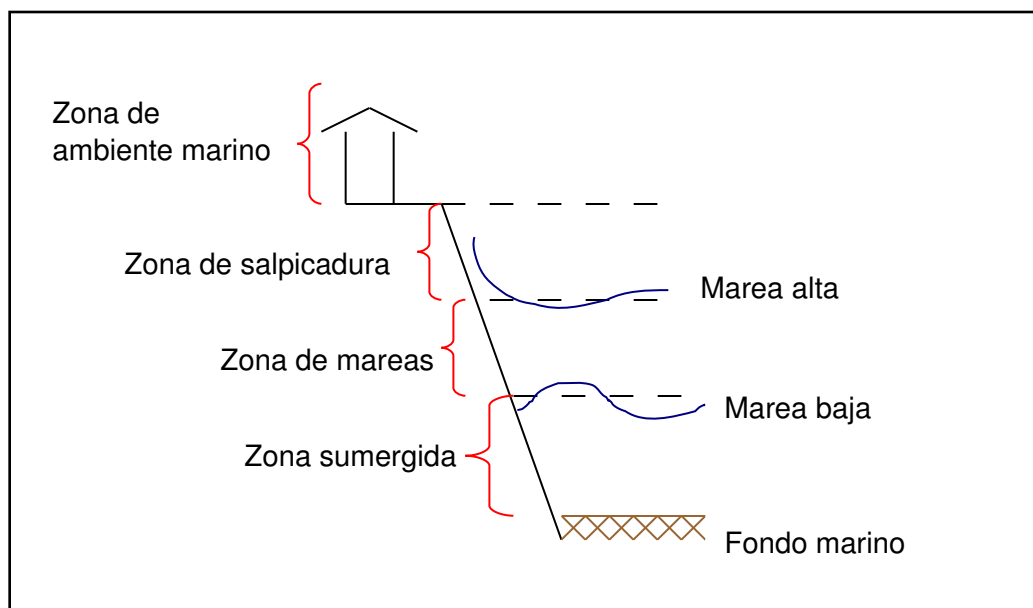
Además, se deben diferenciar los daños por condiciones de uso normal o por la acción del clima, por daños o defectos operativos y por daños eventuales como choque de embarcaciones o sismos.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SEGÚN SU UBICACIÓN Y CONDICIONES AGRESIVAS DEL MEDIO

Las estructuras que componen la infraestructura portuaria se pueden clasificar según su ubicación y exposición a los agentes agresivos del medio. De esta forma, se establecen las siguientes zonas, cuyas fronteras no son definidas con exactitud: zona de inmersión, zona de mareas, zona de salpicaduras y zona de ambiente marino. En la Figura 3.1 se pueden observar la ubicación de estas zonas. La clasificación de las estructuras portuarias según esta zonificación es:

En la zona de ambiente marino se encuentran: los edificios, las bodegas, los caminos, los patios y las losas de los muelles. En la zona de salpicadura: se encuentran los pilotes u otras estructuras de soporte o contención y las defensas. En la zona de mareas y en la zona sumergida se encuentran únicamente los pilotes u otras estructuras de soporte o contención. (González de la Cotera: 1998)

FIGURA 3.1 ZONAS SEGÚN EXPOSICIÓN A LOS AGENTES AGRESIVOS DEL AMBIENTE MARINO



Fuente: González de la Cotera, 1998

3.1.1 Zona sumergida

En esta zona los elementos se encuentran siempre sumergidos. En el caso de las estructuras de concreto, la penetración de agua tiene lugar primero por succión capilar, pero en las zonas más profundas la permeabilidad del concreto disminuye pues se cierran los poros superficiales. El agua ingresa con sustancias disueltas como sulfatos y cloruros, sin embargo, debido a la poca concentración de oxígeno en el agua, la actividad corrosiva del ión cloruro se impide (González de la Cotera; 1998). Cuando las estructuras de acero se encuentran en esta zona se ven expuestas a corrosión galvánica, la cual resulta de un fenómeno de electrólisis. En el agua marina, las sales

disueltas mejoran las propiedades conductoras de los electrolitos, posibilitando una reacción electroquímica mas intensa.

Además, en esta zona los elementos portuarios se encuentran expuestos a las adherencias marinas, las cuales pueden causar daños, como se explicará más adelante.

3.1.2 Zona de marea

Esta zona se encuentra entre los niveles de alta y baja marea. Aquí los elementos se encuentran permanentemente húmedos, debido a que la inmersión es cíclica durante un día. En el concreto sucede que los poros se encuentran saturados debido a que el tiempo de baja marea es corto y el concreto no llega a secarse completamente, pues éste absorbe agua más rápidamente de lo que la pierde, disminuyendo el peligro de corrosión (González de la Cotera:1998). Sin embargo, el golpe de embarcaciones o la acción de las olas pueden producir fisuras en el concreto, acelerando el proceso de corrosión. Para los elementos de acero, esta zona es muy agresiva, pues la corrosión de estos elementos se intensifica con la presencia de mucha agua, mucho oxígeno y mucha sal.

En la zona de marea, la intervención para realizar reparaciones es bastante incómoda, debido a las condiciones continuas de humedad y el cambio cíclico de las mareas.

3.1.3 Zona de salpicaduras

Esta zona se ubica por encima del nivel de marea alta, y es donde salpican las olas y el baño de la espuma. Aquí se presenta el riesgo de ciclos alternos de humidificación y secado, de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad relativa, que pueden afectar severamente las estructuras.

En el caso de las estructuras de concreto, el ión cloruro penetra por difusión y al secarse se elimina el exceso de agua pero se retiene el cloro, aumentando la amenaza de corrosión por cloruros. Además, la corrosión por carbonatación también es muy

común en esta zona. Para las estructuras de acero, esta zona, al igual que la zona de marea, se ve muy afectada por los procesos de corrosión.

A pesar de ser una zona que presenta riesgos de corrosión muy altos para cualquier tipo de estructura, se puede controlar e intervenir con más facilidad que las zonas anteriores.

3.1.4 Zona de ambiente marino

Las estructuras que se encuentran en esta zona no están en contacto directo con el agua de mar, pero si reciben las sales procedentes de la brisa marina. En Puerto Limón las estructuras que se encuentran en esta zona son: edificios, bodegas, patios, caminos y losas y vigas de muelles. La extensión de esta zona depende principalmente de las características de los vientos dominantes en el litoral.

En la brisa marina la concentración salina puede ser inclusive mayor que en el agua de mar, especialmente si la temperatura es alta. Además, si la humedad del ambiente también es alta, los poros del concreto se cubren de agua absorbida y los cloruros se difunden en el concreto, activando el proceso de corrosión, lo que reduce la sección de acero de refuerzo y provoca la expansión del concreto, presentándose fisuras, grietas y desprendimiento del revestimiento. En los elementos de acero, la corrosión también es un problema muy severo que debe ser tratado con seriedad.

3.2 DAÑOS POR LA ACCIÓN DEL CLIMA Y ELEMENTOS MEDIOAMBIENTALES

Al determinar los daños en la infraestructura portuaria y las propuestas para su reparación, es de gran importancia conocer las condiciones climáticas y medioambientales a las que se encuentra expuesta la infraestructura.

Las condiciones climáticas influyen principalmente en los procesos de corrección de fallas de los sistemas portuarios y en las reparaciones mayores, ya que las altas

temperaturas y fuertes lluvias que caracterizan a la provincia de Limón, pueden reducir el rendimiento de los operarios o detener del todo las actividades de mantenimiento o reparación.

Las condiciones medioambientales que se encuentran en los puertos, como lo son la brisa marina, las mareas y las adherencias marinas en los elementos portuarios, pueden producir daños severos a la infraestructura sino son considerados y evaluados periódicamente.

3.2.1 Corrosión en estructuras de concreto reforzado expuestas al ambiente marino

Las estructuras de concreto reforzado en las zonas marítimas, principalmente en climas tropicales como el de Costa Rica, con temperaturas elevadas y humedad relativa bastante considerable, se ven expuestas a un deterioro muy fuerte. La corrosión del acero de refuerzo es el mayor problema que enfrentan dichas estructuras.

La vida útil de la infraestructura portuaria definitiva debe ser de por lo menos 50 años para obras de carácter general en grandes puertos (ROM 02-90: Criterios generales de proyecto; 1990). Sin embargo, debido al fenómeno de la corrosión la durabilidad de estas estructuras puede ser menor si no se toman las consideraciones necesarias para evitarlo o disminuirlo.

Composición química del agua de mar

La mayoría de las aguas de mar tienen una composición química uniforme, caracterizada por la presencia de un 3,5% de sales solubles en peso. Las mayores concentraciones iónicas son las del sodio (Na^+) y del cloro (Cl^-). También hay cantidades significativas de magnesio (Mg^{2+}) y sulfatos (SO_4^{2-}). El pH varía entre 7,5 y 8,41. (Bermúdez; Alaejos; Lanza.)

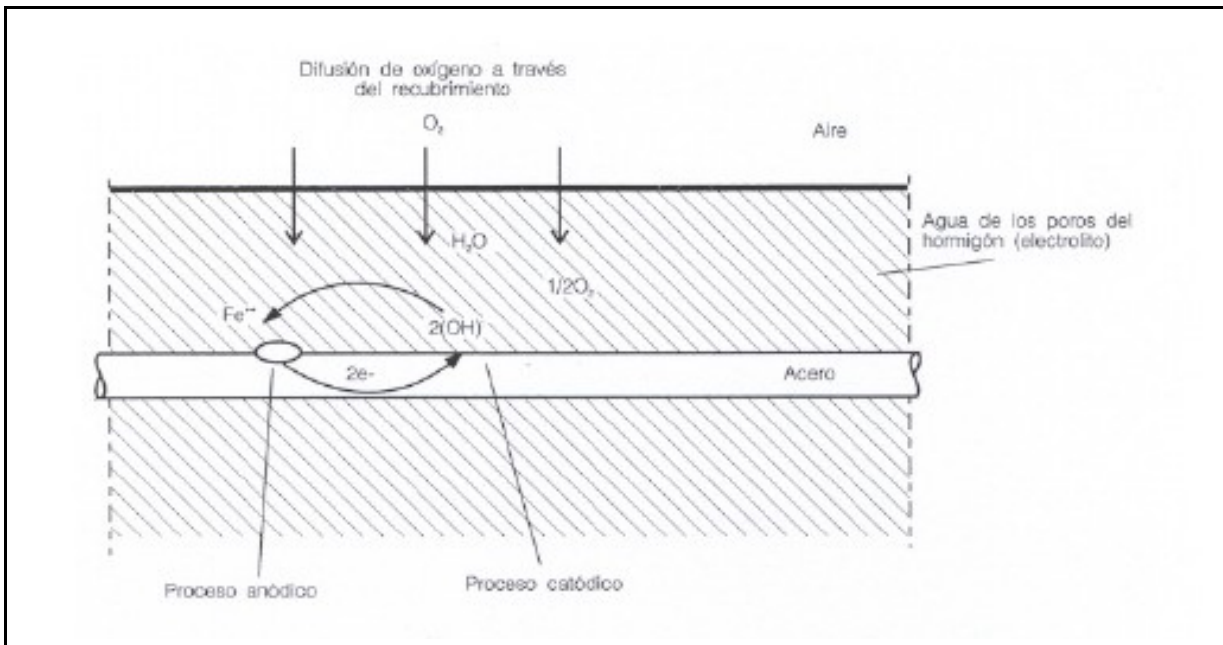
Proceso de corrosión

La corrosión es un proceso electroquímico que se vincula con la temperatura y la humedad relativa del ambiente, pues éstas características climáticas activan y potencializan las reacciones químicas de la corrosión. “Se estima que un aumento de 10°C duplica la velocidad de las reacciones. La corrosión por carbonatación se activa en el rango de 60 a 90% de humedad relativa. En el caso de la corrosión por cloruros el efecto de la humedad es importante, en especial en los niveles de 70 a 90% de humedad relativa”. (González:1998)

Para que el proceso de corrosión se active se requiere la presencia de oxígeno, agua o humedad, un ánodo donde suceda la reacción de oxidación, un cátodo donde se efectúe la reacción de reducción y una conexión eléctrica entre el ánodo y el cátodo que permita la transferencia de electrones. El ánodo y el cátodo son dos áreas diferentes sobre la superficie del metal y el concreto funciona como un ión electrolito en un circuito cerrado, como se muestra en la Figura 3.2. Al penetrar el ión cloruro en el concreto actúa como catalizador en la oxidación, activando la reacción en el ánodo y liberando electrones que fluyen al cátodo.

Al liberarse los electrones en el ánodo, debido a la presencia del cloruro, el hierro (Fe^{2+}) se combina con el hidróxido que se produce en el cátodo al ingresar los electrones liberados del ánodo y mezclarse con el agua y el oxígeno presentes. La combinación del hierro y el hidróxido produce hidróxido ferroso, el cual tiene un color verdoso y es el primer paso en el proceso de la oxidación. Con un mayor grado de oxidación se produce óxido ferroso-férrico de color negro e hidróxido férrico de color rojizo. Esta transformación del hierro metálico en óxido viene acompañada de un incremento de volumen que puede llegar a ser del 600% del tamaño original del metal, lo que se considera la principal causa de la expansión y desfiguración del concreto. (Bermúdez; Alaejos; Lanza)

FIGURA 3.2. ESQUEMA DEL PROCESO DE CORROSIÓN



Fuente: Bermúdez; Alaejos; Lanza

Tipos de corrosión

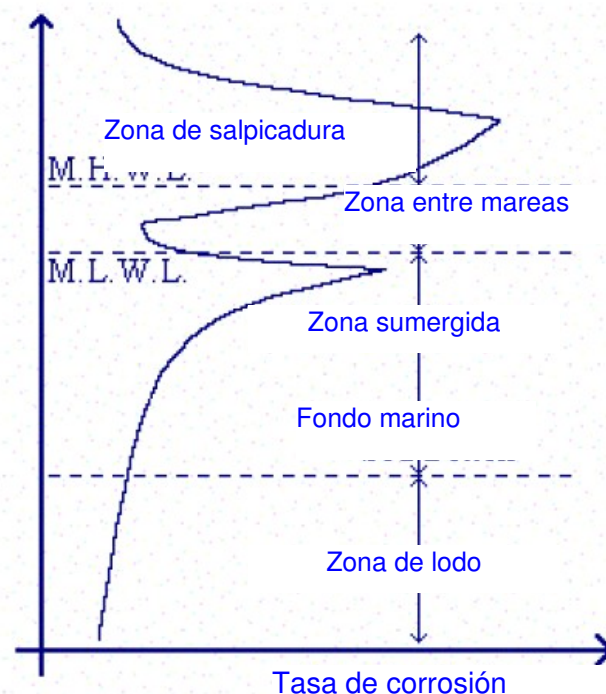
La corrosión supone una pérdida de material metálico a partir de una pila electroquímica que se forma entre dicho elemento metálico y otro material próximo y suele aparecer como consecuencia de un proceso de oxidación-reducción, afectando a todos los metales, especialmente al [acero](#) por su contenido en [hierro](#). (Construpedia: 2009) En los elementos de acero, la corrosión supone una pérdida de sección, que implica una pérdida de capacidad estructural. En el concreto, la corrosión se puede producir por diferentes procesos:

- *Corrosión por carbonatación:* se inicia con la combinación del hidróxido de calcio presente en el cemento, con el CO_2 de la atmósfera. Esto reduce la alcalinidad del concreto y por consiguiente reduce la protección al refuerzo.
- *Corrosión por cloruros:* el ión cloruro presente en el agua y la brisa marina penetra en el concreto y forma parte activa de la oxidación del acero de refuerzo, como se explicó anteriormente. Debido a este proceso se concentran iones de cloruro en la superficie catódica y se reduce el PH del concreto reforzado. Los

sulfatos presentes también en el agua y la brisa marina, atacan al concreto formando compuestos expansivos que provocan fisuras y grietas, por donde penetra con mayor facilidad el cloruro, acelerando el proceso de corrosión del acero de refuerzo.

Según se consulto en el Boletín técnico, **Corrosión en pilotes** (CorroTek: 2009), en el ambiente marino, los pilotes sufren diversos grados de corrosión, según su zona de exposición. De esta forma, en el Gráfico 3.1 se observa que en la zona de salpicadura es donde el proceso de corrosión sucede más rápidamente, por lo cual se debe brindar gran protección al pilote en esta zona. Otra zona que requiere mucha protección es entrando a la zona sumergida, que se muestra en el Gráfico 3.1 como otro pico.

GRÁFICO 3.1 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN MARINA SEGÚN LA ALTURA DE UN PILOTE



Fuente: http://www.achcorr.cl/BT-11Corrosion_en_Pilotes_JORGE.pdf (consultado el 19/10/08)

3.2.2 Adherencias marinas

Las adherencias marinas son diversas formas de organismos marinos desarrollados en la superficie de estructuras marítimas, como algas, moluscos o crustáceos. Por lo general se desarrollan a profundidades mayores a los 20m, sin embargo muchas especies se concentran en la superficie, donde penetran los rayos solares.

Estos organismos ocasionan un gran número de efectos adversos en las estructuras marítimas. Los crustáceos y las algas que se adhieren a los pilotes y otras estructuras, hacen que el diámetro de éstos aumente, pero al no tener una masa considerable, y además ser frágiles, se remueven rápidamente al presentarse fuertes tormentas.

Ciertos organismos marinos como los percebes (un tipo de crustáceo) y erizos de mar, segregan ácidos que corroen las superficies de acero. Algunos tipos de moluscos secretan también ácidos que atacan los agregados calizos, disminuyendo la resistencia del concreto.

Algunos tipos de moluscos, como el teredo (familia de las almejas), atacan las estructuras de madera de afuera hacia adentro, dejando el pilote como si fuera una aguja de madera. Por otro lado, crustáceos como la limnoria (familia del cangrejo), se introducen en el pilote de madera por una pequeña abertura, destruyendo su interior y dejándolo hueco.

En las áreas donde el ataque de los organismos marinos es muy severo, se protegen los pilotes de madera sometiéndolos a un tratamiento que es una combinación de arseniato de cobre seguido por alquitrán de hulla y creosota; ambas sustancias, aplicadas bajo calor y presión, son necesarias para que los pilotes se conserven en agua salada entre 15 y 25 años.

3.3 DAÑOS OCASIONADOS POR LA OPERACIÓN DEL PUERTO

Los daños o defectos operativos son producto de las actividades diarias que se llevan a cabo en el puerto. Si se cuenta con un programa de inspección y mantenimiento periódico, es posible evitar que estos daños aumenten en magnitud y gravedad, de forma que puedan ser corregidos antes de que afecten la integridad estructural y funcional de las instalaciones portuarias.

Según un sondeo preliminar realizado en la primera visita a Puerto Limón, se estableció que los elementos de la infraestructura portuaria que presentan mayor cantidad de daños operativos son: las defensas, los bordillos de protección de los muelles y las parrillas que cubren las obras de drenaje en los caminos y patios. Las defensas se ven muy expuestas a este tipo de daños debido a las continuas maniobras de atraque de las embarcaciones. Estas sufren daños como grietas en el cuerpo de hule, deterioro de los anclajes y daños en la lámina de metal cubierta de almohadillas de neopreno. Los bordillos de protección de los muelles son de gran utilidad para evitar la caída al mar de grúas equipos y herramientas, y para hacer visible el límite del muelle. Estos bordillos tienden a ser golpeados continuamente, debido a las manipulaciones de carga y descarga. Las parrillas que cubren las obras de drenaje en los caminos y patios también se ven sometidas a daños operativos, ya que los contenedores que pasan todos los días levantan las parrillas que cubren estas obras.

3.4 DAÑOS POR CHOQUE DE EMBARCACIONES Y SISMOS

Estos son aquellos que no suceden de forma regular y cuya ocurrencia no se pueden prever, pero cuando ocurren, pueden afectar significativamente las operaciones del puerto. Es importante que la administración del puerto, en este caso JAPDEVA, cuente con registros estadísticos de la incidencia de daños por choque de embarcaciones o sismos, con el fin de que aún cuando no es posible programar la reparación de estos

daños, se realice una estimación de las reparaciones con base en las estadísticas de períodos anteriores y un análisis de las causas de este tipo de daños.

3.4.1 Choque de buques

Uno de los daños eventuales que se puede presentar en un puerto es la colisión de embarcaciones en los muelles. Este acontecimiento puede provocar fallas en los pilotes, las vigas y la losa de los muelles.

En Puerto Limón se realizó recientemente una reparación en el Muelle de Cruceros, ya que el 26 de enero del 2005 el barco Costa Allegra colisionó con el puente de acceso del muelle ocasionando daños a la losa estructural y superficie de ruedo, vigas longitudinales y transversales y a los pilotes. En este puerto, no se cuenta con índices de incidencia de este tipo de daños, sin embargo, los ingenieros de JAPDEVA aseguran que no es común que los buques choquen con los muelles durante las maniobras de atracado y desatraco (consulta realizada al ingeniero Greivin Villegas).

3.4.2 Sismo

El cantón de Limón se localiza dentro de una región sísmica caracterizada por la presencia de importantes fallas. El último evento importante ocurrió el 22 de abril de 1991 y su epicentro se localizó al sur del cantón con una magnitud de 7.5 grados en la escala Richter. Este terremoto causó daños importantes a viviendas, líneas de comunicación y servicios básicos como carreteras, puentes, tendido eléctrico, etc.

Los efectos geológicos más importantes que sucedieron con este evento fueron: levantamiento de la costa, que llegó en algunos lugares a ser de hasta 1.5 m, licuefacción que se presentó en muchos lugares cercanos a la costa y deslizamientos que se presentaron sobre todo en las partes altas de las principales cuencas.

Algunos de los problemas ocasionados en Puerto Limón por el sismo de 1991 son:

- Problemas de licuefacción: ocasionaron asentamientos diferenciales en caminos y patios.
- Levantamiento de la placa continental, que ocasionó una pérdida de calado de hasta 0,8 m n el Muelle Alemán, según el artículo El terremoto de Limón, de la Revista Geológica de América Central.
- Vigas y pilotes de los muelles sufrieron daños que comprometieron su integridad estructural.
- Se deformaron estructuras como los rieles de la grúa del Muelle Alemán.

4 INVENTARIO DE DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA DE PUERTO LIMÓN

Como se presentó en los capítulos anteriores, un 85% de las importaciones y exportaciones nacionales se manejan por los puertos del Caribe. Además, en Puerto Limón atracan la mayoría de los cruceros que visitan Costa Rica, siendo entonces un puerto de gran importancia comercial y turística para el país.

De esta forma, la infraestructura portuaria debe responder a las demandas tanto de un comercio muy activo durante todo el año, como de un turismo también muy activo durante ciertos meses. Los muelles, los caminos, los patios, los edificios y las bodegas deben estar en sus mejores condiciones, para que la interacción entre mercancías y personas suceda de forma ordenada, segura y en un tiempo óptimo.

La integridad estructural y funcional de todas las obras que componen la infraestructura portuaria debe ser orden primordial para la administración del puerto. Así, un inventario de daños en la infraestructura portuaria es de gran utilidad para establecer programas de mantenimiento según el estado físico en que se encuentre cada estructura, la importancia o grado de influencia que tiene en la prestación de servicios portuarios y la utilidad o rentabilidad que brinda a la administración portuaria.

Es importante recordar que para efectos del presente proyecto, las instalaciones portuarias que se estudiaron fueron las siguientes: muelles, caminos, patios y rompeolas; dejando de lado el estudio de los edificios y bodegas.

En este capítulo se presenta la información de los daños encontrados en la infraestructura portuaria de Puerto Limón de la siguiente manera: se realizó un estudio por cada uno de los componentes del puerto: muelles, patios, caminos y rompeolas, y al final de capítulo se resumen todos los daños en un cuadro.

4.1 MUELLES

Los muelles de Puerto Limón son cuatro: Muelle 70, Muelle de Cruceros, Muelle Alemán y el Muelle de Remolcadores. Además se incluye en este apartado las rampas Roll on Roll off (Ro/Ro).

4.1.1 MUELLE 70

Este muelle ya no es utilizado de forma regular, pues según el informe *“Estudio de Ingeniería para la Rehabilitación del Muelle 70 y Rampa para Remolcadores”*, por el Ing. José Manuel Camacho, *“la estructura presenta daños importantes que la hacen insegura desde un punto de vista estructural; especialmente ante eventos sísmicos de mediana intensidad. Igualmente, para cargas verticales el estado de la estructura es precario.”* En este apartado se explican los daños estudiados en el informe mencionado.

Pilotes

Los pilotes del Muelle 70 se encuentran colocados en 35 filas, la mayoría de 8 pilotes cada una., hincados en 4 pares, dos verticales en los extremos y dos inclinados en los puntos medios. Son prefabricados en concreto, con una sección transversal cuadrada.

En el Cuadro 4.1 se muestra de forma general los daños que presentan los pilotes del Muelle 70. Más de la mitad de los pilotes presentan daños como fisuras, desprendimientos de concreto, exposición del acero de refuerzo y corrosión. Además, se observó que muchos de los daños presentes en los pilotes se ubican en la unión con las vigas transversales o caballetes.

En la Figura 4.1 se observan 2 pilotes del Muelle 70 que presentan desprendimiento de concreto y corrosión en el acero de refuerzo.

CUADRO 4.1 DAÑOS PRESENTES EN PILOTES DEL MUELLE 70

Estado de los pilotes	Número de pilotes	Porcentaje del total (%)
Pilotes con pocos daños aparentes	114	40,7
Pilotes muy fisurados	95	33,9
Pilotes con desprendimientos de concreto y leve exposición del acero de refuerzo	42	15
Pilotes con daños muy avanzados, acero de refuerzo con corrosión y muy expuesto	14	5
Pilotes en los que el acero de refuerzo ha desaparecido y pilotes que no tienen conexión viga caballete	15	5,4

Fuente: Camacho; 2008

FIGURA 4.1 PILOTES DEL MUELLE 70



Fuente: JAPDEVA

Vigas

Un número importante de vigas transversales presentan problemas serios de desprendimiento de concreto (ver Figura 4.2), corrosión en el acero de refuerzo, daños en los apoyos de las vigas T longitudinales y en la unión estructural con los pilotes, entre otros. Algunas de estas vigas han sido reparadas anteriormente. El Cuadro 4.2 muestra aproximadamente el 50% de las vigas caballete presentan daños avanzados. Similarmente sucede con las vigas transversales, que aunque en menor grado, también presentan daños como desprendimientos de concreto, corrosión en el acero de refuerzo y daños en los apoyos de las vigas.

CUADRO 4.2 DAÑOS PRESENTES EN LAS VIGAS DEL MUELLE 70

Estado de las vigas	Número de vigas	Porcentaje del total (%)
Desprendimientos de concreto y exposición del acero de refuerzo longitudinal	1	4

Daños muy avanzados, acero de refuerzo longitudinal con corrosión y muy expuesto	18	51
El acero de refuerzo longitudinal ha desaparecido en su mayoría	12	34
Refuerzo no funcional, ha desaparecido	4	11

Fuente: Camacho; 2008

La viga de borde se encuentra bastante dañada en el lugar donde el buque está hundido, ya que el oleaje promueve la fricción entre el muelle y la proa, desgastando la viga y la losa, como se muestra en la Figura 4.3. Además, en el lado oeste de este muelle se encuentra otro barco hundido, inhabilitando este costado opuesto para el atraque de embarcaciones.

FIGURA 4.2 VIGAS DEL MUELLE 70



Fuente: JAPDEVA

FIGURA 4.3 BARCO HUNDIDO DAÑANDO EL MUELLE 70



Fuente: La autora

Losa

Este elemento presenta gran cantidad de grietas por donde se filtra la humedad que llega al acero provocando corrosión y consiguientemente la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto y la formación de más grietas. En la Figura 4.4 se puede apreciar la losa de este muelle y el patrón principal de grietas que se resalta en color rojo.

FIGURA 4.4 LOSA AGRIETADA DEL MUELLE 70



Fuente: La autora

Defensas

Las defensas de este muelle son de hule y tienen ya varios años de estar colocadas y no recibir un mantenimiento adecuado, por lo cual su estado es bastante defectuoso. La mayoría de ellas, un total de 17 presentaron grietas y anclajes sueltos. En la Figura 4.5, la grieta señalada es la responsable de que la defensa ya no cumpla su función efectivamente.

FIGURA 4.5 DEFENSA DAÑADA DEL MUELLE 70



Fuente: La autora

4.1.2 MUELLE DE CRUCEROS

Como se mencionó anteriormente, en el año 2005, el barco Costa Allegra colisionó con el puente de acceso del muelle. Los daños que se presentaron en el muelle debido a este choque se detallan a continuación:

Pilotes

Un pilote vertical y de borde fue impactado bajo el nivel del mar. En la Figura 4.6 se observa el pilote dañado después de que fue removido del sitio, el cual presenta deformaciones permanentes y pandeo.

Cabe destacar que este pilote presentó un daño eventual, debido al choque de la embarcación, pero el resto de los pilotes de este muelle se encuentran en buenas condiciones, sin presentar daños que requieran intervención. Sin embargo, es importante mencionar que estas estructuras pueden presentar daños potenciales como la corrosión que es bastante común, para lo cual es vital aplicar procedimientos de prevención de daños, como los encamisados, así como la revisión de los sistemas de protección catódica.

Figura 4.6: Pilote dañado por la grúa



Fuente: Constructora ANED

Vigas

Con esa colisión se dañaron tanto vigas transversales como longitudinales. Se desprendió concreto y se presentan agrietamientos en las uniones entre vigas transversales y longitudinales. Además, se ocasionaron daños importantes al acero superior de las vigas. De la misma manera que los pilotes, estos elementos sufrieron daños debido a un evento especial, pero el resto de las vigas que componen el Muelle de Cruceros se encuentran en buen estado, sin embargo, un daño potencial que pueden sufrir las vigas es la pérdida de recubrimiento debido a la laminación del acero.

Losa

La losa estructural funciona como diafragma rígido y como superficie de ruedo, además integra monolíticamente las vigas longitudinales con las vigas transversales. Los daños que se ocasionaron en la losa fueron: destrucción de una zona de la losa del muelle, agrietamientos, y pandeo y corte del acero de refuerzo. (ver Figura 4.7)

Las losas estructurales de los muelles se encuentran expuestas a daños potenciales como los agrietamientos debidos, al igual que en las vigas, a una pérdida de recubrimiento por laminación del acero y al desgaste debido a la operación normal del muelle.

FIGURA 4.7 GRIETA EN LOSA DE MUELLE DE CRUCEROS DEBIDO A COLISIÓN



Fuente: La autora

Defensas

Las defensas en el Muelle de Cruceros de forma general se encuentran en buen estado, sólo 2 de ellas presentaron daños operativos normales, (ver Figura 4.8), como el desprendimiento de algunas almohadillas de neopreno y grietas en su cuerpo de hule. Estos daños con un adecuado plan de mantenimiento se pueden corregir a tiempo y de forma expedita.

Es importante mencionar que las defensas pueden presentar también problemas en el cuerpo de hule o en sus anclajes.

FIGURA 4.8 DEFENSA DAÑADA DEL MUELLE DE CRUCEROS



Fuente: La autora

Al final del Muelle de Cruceros hay unas pasarelas que actualmente se encuentra en proceso de licitación para colocar 120 metros lineales de malla expandida acerada de 4 mm de espesor para cubrir 4 pasarelas. Estas mallas deben ser pintadas con pintura anticorrosiva, con el fin de preservar la obra una mayor cantidad de años.

4.1.3

MUELLE ALEMÁN

Este muelle es utilizado para el manejo de mercadería. Los daños que presenta son operativos y por la acción del oleaje. Entre los daños operativos se encuentran el desgaste en la losa tanto en el muelle como en los patios, debido a que el tránsito diario de carga y maquinaria pesada, como las grúas y cargadores, desgasta la estructura del pavimento y daña las obras de drenaje. De las defensas de este muelle, 8 de ellas presentan daños operativos leves y que requieren mantenimiento.

Con el terremoto del 91, los rieles de las grúas fueron desalineados y el patio de contenedores se vio afectado. Además, el daño encontrado por la acción del oleaje es el deterioro del rompeolas, ya que durante tormentas fuertes esta estructura se ve sometida a grandes fuerzas, sin embargo, debido al cambio en la geografía de la costa después del terremoto del 91, el oleaje al que se enfrenta el rompeolas es de menor magnitud del que enfrentaba antes del terremoto, con lo cual los daños en esta estructura se redujeron considerablemente, a tal grado que desde esa fecha no presenta problemas.

4.1.4 MUELLE DE REMOLCADORES

Este muelle se terminó de construir recientemente, por lo cual actualmente no presenta daños (ver Figura 4.9). Se considera que este muelle puede presentar daños potenciales como la corrosión, tanto en vigas como en pilotes. El mantenimiento de esta estructura esta a cargo de la administración del Puerto Limón y aún cuando es de tan reciente construcción es importante realizar inspecciones para identificar cualquier situación a tiempo.

FIGURA 4.9 MUELLE DE REMOLCADORES



Fuente: La autora

4.1.5 RAMPAS RO/RO

Estas rampas se encuentran expuestas a un problema particular: el desgaste irregular de la superficie de concreto, debido a la fricción que se ocasiona entre la superficie mencionada y la plataforma de la embarcación. En la Figura 4.10 se observa el desgaste en la losa de concreto de la Rampa Ro/Ro contigua al Muelle de Cruceros.

FIGURA 4.10 DESGASTE DE RAMPA RO/RO



Fuente: La autora

4.2 PATIOS Y CAMINOS

Los patios y caminos de Puerto Limón tienen pavimentos de asfalto, de concreto y adoquinados. Para el momento en que se realizó el proyecto, se habían reemplazado 100 m² de pavimento de concreto, 500 m² de adoquinado en la terminal de Contenedores, se realizó un bacheo de 8 toneladas de asfalto en el acceso de Puerto Limón y se realizó una reparación de un hundimiento en el patio, frente al taller mecánico, de 225 m². En la Figura 4.11 se observan algunos adoquines quebrados.

FIGURA 4.11 ADOQUINES QUEBRADOS EN PATIO DE PUERTO LIMÓN



Fuente: La autora

4.3 ROMPEOLAS

El rompeolas de Puerto Limón se encuentra en excelentes condiciones, sin embargo, para el momento en que se realizó el estudio se habían reemplazado 120 cubos de concreto en el talud del rompeolas. En la Figura 4.12 se observa el reemplazo de los cubos de concreto.

FIGURA 4.12 ROMPEOLAS DE PUERTO LIMÓN



Fuente: JAPDEVA

4.4 INVENTARIO DE DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA DE PUERTO LIMÓN

En este apartado se presenta un resumen de los daños encontrados en la infraestructura portuaria de Puerto Limón. El Cuadro 4.3 muestra este resumen.

Se tomaron los daños encontrados en todos los muelles que conforman el puerto: Muelle 70, Muelle de Cruceros, Muelle Alemán, Muelle de Remolcadores y Rampas Ro/Ro, y se resumieron en el primer bloque del cuadro, el de la instalación de muelles. En el segundo bloque se esquematizan los daños encontrados en los patios y caminos, y por último, se presenta el bloque de rompeolas, el cual cabe destacar que se encuentra en buenas condiciones, presentando sólo algunas unidades que debieron ser reemplazadas.

Cabe destacar que este inventario no es definitivo, pues contiene datos de reparaciones que ya se habían realizado en el momento del estudio y otras que aún no se han llevado a cabo. Es importante rescatar que este inventario debe ser actualizado constantemente para que la administración de Puerto Limón pueda monitorear la

condición de la infraestructura portuaria y tomar decisiones en aspectos preventivos y correctivos de forma efectiva.

CUADRO 4.3 INVENTARIO DE DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA DE PUERTO LIMÓN

Estructura		Daños	Inventario	Causa del daño	
Muelles	Muelle 70	Pilotes	Fisurados	95	El ambiente marino, potencializado por la falta de mantenimiento y la prolongación de su uso a pesar de que su vida útil original era de apenas 10 años
			Con desprendimientos de concreto y leve exposición de acero de refuerzo	42	
			Acero de refuerzo con corrosión y muy expuesto	14	
			Acero de refuerzo desaparecido y pilotes sin conexión a vigas caballete	15	
		Vigas	Desprendimientos de concreto y exposición del acero de refuerzo longitudinal	1	
			Acero de refuerzo longitudinal con corrosión y muy expuesto	18	
			Acero de refuerzo longitudinal desaparecido en su mayoría	16	
	Losa	Agrietamiento	cerca del 70%		
	Defensas	Grietas y anclajes sueltos	17		
	Muelle de Cruceros	Pilotes	Deformaciones permanentes y pandeo	1	Choque de embarcación
		Vigas	Desprendimientos de concreto, agrietamientos en uniones de vigas y daños severos a acero de refuerzo	3	
		Defensas	Desprendimiento de almohadillas de neopreno y agrietamientos en su cuerpo de hule	2	Operación normal del muelle
		Losa	Agrietamiento	18 unidades en el puente de acceso	Choque de embarcación y operación normal del muelle
	Muelle Alemán	Defensas	Desprendimiento de almohadillas de neopreno y agrietamientos en su cuerpo de hule	8	Operación normal del muelle

	Rampas Ro/Ro	Desgaste de losa de concreto	Rampa Ro/Ro en Muelle de Cruceros		
	Bordillos	Quebrados y/o perdidos	124		
Caminos y patios	Pavimento	General	Hundimientos	225 m ²	Sismo
		Adoquines	Adoquines quebrados y/o dañados	5000 m ²	Operación normal del muelle
		Asfalto	Carpeta desgastada	8 ton	Operación normal del muelle
	Obras de drenaje	Levantamiento de parrillas	Empernar parrillas a base		
	Rompeolas	Pérdida de capacidad estructural	120 unidades de 2500 Kg c/u	Acción del oleaje durante tormentas fuertes	

Fuente: La autora

Como se mencionó anteriormente, este inventario no es definitivo, e incluye datos de daños que ya se han reparado como datos de daños por reparar próximamente. Los daños enlistados del Muelle 70 aún no han sido reparados, mientras que el resto de los daños inventariados ya se resolvieron.

5 MÉTODOS CONSTRUCTIVOS RECOMENDADOS PARA LA REPARACIÓN DE LOS DAÑOS ENCONTRADOS EN LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA DE PUERTO LIMÓN

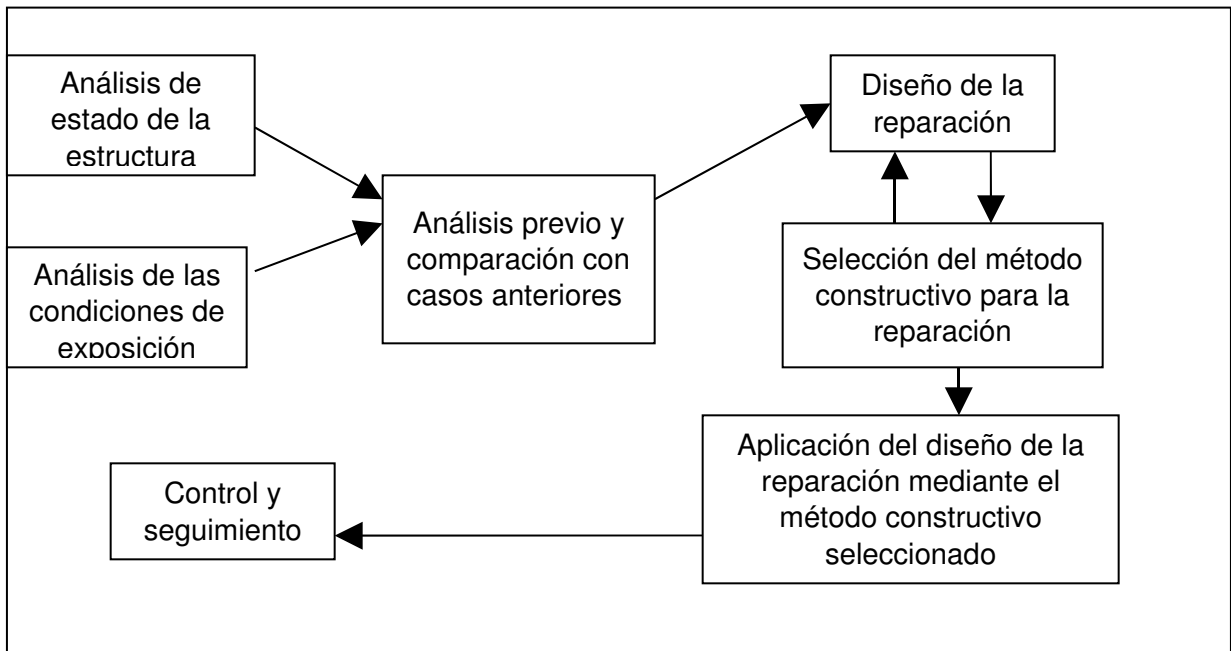
Antes de llevar a cabo cualquier reparación, es necesario seguir un procedimiento de análisis que empieza con el estudio del estado de la estructura que se va a reparar y las condiciones ambientales a las que se encuentran expuesta la estructura. Realizada esta fase, se procede a analizar previamente los materiales, equipo y mano de obra que se pueden utilizar además, se debe comparar con casos anteriores de reparación de daños similares y después se procede con el diseño de la reparación. Al realizar el diseño se deben considerar aspectos como la durabilidad y el costo de la reparación, si hay que desocupar total o parcialmente el área a reparar y la accesibilidad y facilidad para realizar los trabajos de reparación. Todo esto conforma la selección del método constructivo de la reparación. Para efectos del presente proyecto de graduación, no se consideró el estudio de los costos de cada uno de los métodos constructivos, pues se considera que este aspecto es muy variable, debido a condiciones como la oferta y demanda de los materiales, la ocupación del puerto en el momento de realizar las reparaciones, entre otras.

Una vez realizada la reparación, es importante documentar el daño encontrado, el diseño y el método de reparación utilizado, con el fin de que la administración del puerto cuente con un inventario de daños en la infraestructura portuaria y los métodos constructivos utilizados para su reparación, el cual es de gran utilidad para llevar un control y un seguimiento adecuado para la programación de obras de mantenimiento y reparación. Este tipo de control permite identificar los casos más comunes de daños y prevenir los que sean posibles, de manera que se pueda realizar una planificación adecuada de las reparaciones que se deben realizar en el puerto, según su magnitud e importancia para las actividades portuarias. Además, este tipo de control de los daños

permite establecer un punto de partida para valorar inversiones futuras en mejoramientos de equipo e infraestructura.

La Figura 5.1 muestra un esquema correctivo del proceso de análisis y causas de reparación que se puede aplicar en obras portuarias, y que permite alimentar un inventario de daños y procedimientos constructivos para su reparación, el cual es de ayuda en el desarrollo y mantenimiento de la infraestructura portuaria.

FIGURA 5.1 PROCESO DE ANÁLISIS Y CAUSAS DE REPARACIÓN EN OBRAS PORTUARIAS



Fuente: la autora

Además de este proceso correctivo, es de gran utilidad tomar como base el inventario de daños en la infraestructura portuaria para determinar las medidas preventivas necesarias, con el fin de evitar hasta donde sea posible la ocurrencia de los daños.

En el Cuadro 5.1 se muestra un resumen de acciones de reparación que se pueden llevar a cabo, según el tipo de daño encontrado en cada uno de los componentes de la

infraestructura portuaria. Para cada acción de reparación existen varios procedimientos constructivos aplicables, de los cuales, en este proyecto se detallan algunas opciones.

CUADRO 5.1 RESUMEN DE ACCIONES DE REPARACIÓN DE DAÑOS EN PUERTO LIMÓN SEGÚN

LAS DIFERENTES PARTES DE LAS INSTALACIONES ESTUDIADAS

Estructura		Daños	Reparación	
Muelles	Muelle 70	Pilotes	Fisurados	Inyección de grietas
		Pilotes	Con desprendimientos de concreto y leve exposición de acero de refuerzo	Recubrimientos o encamisados en zonas de splash y entre mareas y protección catódica en zona sumergida
			Acero de refuerzo con corrosión y muy expuesto	Demolición y sustitución total
			Acero de refuerzo desaparecido y pilotes sin conexión a vigas caballete	
		Vigas	Desprendimientos de concreto y exposición del acero de refuerzo longitudinal	Aumentar espesores de recubrimiento y utilizar ánodos de sacrificio
			Acero de refuerzo longitudinal con corrosión y muy expuesto	Demolición y sustitución total
	Acero de refuerzo longitudinal desaparecido en su mayoría			
	Losa	Agrietamiento	Inyección y/o relleno de grietas	
	Defensas	Grietas y anclajes sueltos	Reemplazo total de las defensas	
	Muelle de Cruceros	Pilotes	Deformaciones permanentes y pandeo	Sustitución total y recubrimientos de concreto en zonas splash y entre mareas, con protección catódica en zona sumergida
		Vigas	Desprendimientos de concreto, agrietamientos en uniones y daños severos a acero de refuerzo	Demolición y sustitución total
		Defensas	Desprendimiento de almohadillas de neopreno y agrietamientos en su cuerpo de hule	Reemplazo de almohadillas de neopreno y/o reemplazo total de la defensa según sea el caso

		Losa	Agrietamiento	Inyección y/o relleno de grietas
	Estructura		Daños	Reparación
	Muelle Alemán	Defensas	Desprendimiento de almohadillas de neopreno y agrietamientos en su cuerpo de hule	Reemplazo de almohadillas de neopreno y/o reemplazo total de la defensa según sea el caso
	Rampas Ro/Ro		Desgaste de losa de concreto	Colocación de rieles metálicos
	Bordillos		Quebrados y/o perdidos	Reemplazo de unidades
Caminos y patios	Pavimento	General	Hundimientos	Relleno de asentamientos diferenciales
		Adoquines	Adoquines quebrados y/o dañados	Sustitución de unidades
		Asfalto	Carpeta con baches y /o desgastada	Bacheo
	Obras de drenaje		Levantamiento de parrillas	Anclaje de parrillas a base de concreto
Rompeolas			Pérdida de capacidad estructural	Sustitución de unidades

5.1 ENCAMISADOS

Cuando el recubrimiento de concreto falla o llega al fin de su vida útil, y se presentan daños en el pilote producidos por la corrosión, se pueden utilizar encamisados para evitar que esta continúe y que el pilote pierda su capacidad estructural. Estos encamisados pueden ser de concreto, PVC, cintas hechas a base de petróleo, fibra de vidrio, etc. La protección por lo general se localiza en la zona de splash o salpicadura, ya que como se mencionó anteriormente, es la zona donde la velocidad de la corrosión es más alta.

5.1.1 Encamisados de concreto en pilotes

Esta medida se toma a la hora de colocar los pilotes por primera vez, o bien cuando debe realizarse una sustitución total o parcial de los mismos, no se recomienda utilizar en pilotes existentes. Como se mencionó en el Capítulo 3, la zona de salpicaduras es la zona más propensa a la corrosión, por lo que se le debe brindar una buena protección a los pilotes en esta zona. Además, este recubrimiento generalmente cubre también la zona de mareas.

Los pilotes utilizados en Puerto Limón son metálicos, con un diámetro de 56 cm. El recubrimiento con concreto consiste en colocar una protección de concreto de 350 kg/cm², hasta que el pilote alcance un diámetro de 80 cm. Para construir el recubrimiento de concreto es necesario colocar primero una estructura de acero, de varilla #8, soldada al pilote (ver Figura 5.2), para lo cual se requiere de un soldador. Es importante mencionar que esta soldadura se realiza una vez colocado el pilote, ya que nunca se conoce con total exactitud la profundidad de hincado, pues esta depende de factores variables como la resistencia del suelo.

FIGURA 5.2 ESTRUCTURA DE ACERO PARA RECUBRIMIENTO DE CONCRETO



Fuente: Constructora ANED

Luego de hincado el pilote, se coloca la formaleta metálica alrededor (Figura 5.3), se bombea el agua que queda dentro del pilote y se procede a chorrear el concreto. El concreto a utilizar para este tipo de recubrimiento puede ser tanto premezclado como hecho en sitio, dependiendo de la cantidad de concreto que requiera el trabajo y la accesibilidad al sitio. Si es importante controlar la calidad del concreto y que la mezcla sea lo suficientemente fluida e impermeable, para lo cual se utilizan agregados más finos o se le agregan aditivos para cumplir con los requerimientos.

Para este caso de reparaciones es necesario utilizar un concreto fluido sin retracción, de alta manejabilidad, que sea ideal para encamisados y reforzamiento de elementos metálicos, con una alta resistencia al ataque de sulfatos.

Cabe destacar que para realizar este procedimiento, se requiere de balsas, guindolas, andamios y grúas, donde los peones puedan apoyarse para colocar y quitar la formaleta y trabajar con mayor comodidad.

FIGURA 5.3 FORMAleta PARA EL RECUBRIMIENTO DEL PILOTE



Fuente: Constructora ANED

5.1.2 Encamisados de fibra de vidrio en pilotes

Dentro de los encamisados de fibra de vidrio, destaca el Sistema Avanzado de Encapsulado de Pilotes, (ver Figura 5.4) diseñado por la compañía BASF Construction Chemical Latin America. Las principales ventajas que presenta este sistema son:

- Al formar un elemento compuesto con el miembro protegido, el proceso A-P-E permanece íntimamente adherido y no permite la intrusión de oxígeno, sales corrosivas y organismos marinos.
- Es ligero y muy durable
- Presenta alta resistencia
- Se puede ajustar a la medida de cualquier elemento

Los componentes de este sistema son:

A-P-E Camisas translúcidas: Forman parte del sistema compuesto de reparación. Son reforzadas con fibra de vidrio y hechas a la medida del elemento a proteger.

A-P-E Grout: Sistema epóxico 100% sólido de tres componentes específicamente diseñado para el encapsulado en aplicaciones en tierra y bajo el mar.

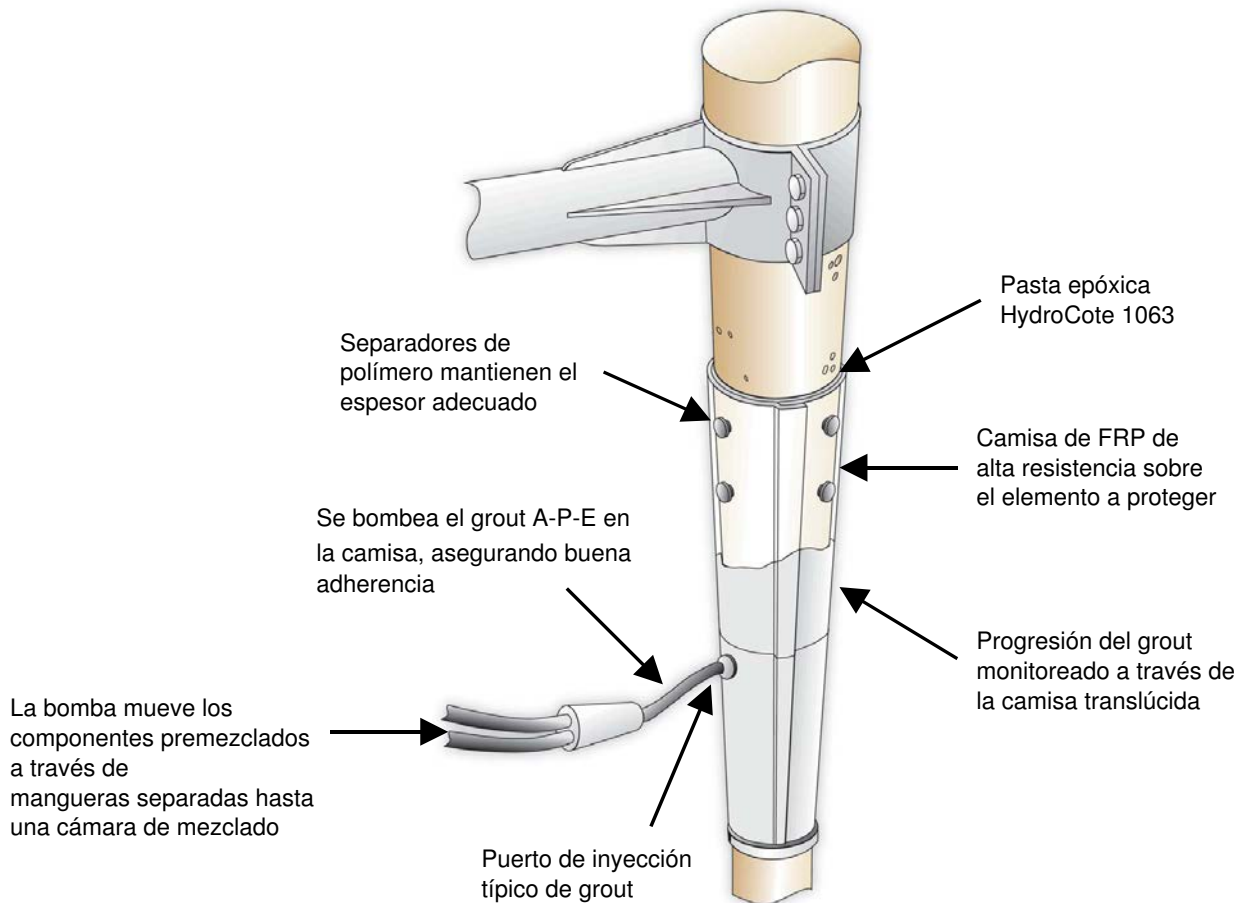
A-P-E Pasta epóxica: Compuestos epóxicos que curan bajo agua para unir las costuras de las camisas, para sellar y para aplicaciones que no descuelgan, como en el tope del encapsulado y en reparaciones bajo agua.

5.1.3 Metalización

La empresa Tecnosagot ofrece como alternativa viable la metalización, la cual consiste en aplicar metal puro fundido en forma de rocío sobre una superficie que puede o no ser metálica, brindando protección contra la corrosión. Dentro de las principales ventajas que ofrece la metalización se encuentran:

- Actúa como una protección galvánica pasiva, protegiendo el acero estructural.
- Se puede aplicar aún cuando la superficie a metalizar esté húmeda.
- No es contaminante para el ambiente.

FIGURA 5.4 PROCESO DE ENCAPSULACIÓN AVANZADA DE PILOTES



Fuente: <http://www.southamerica.basf-cc.com/paises/latin%20america/folletos/apecturebasf0906.pdf>

(consultado el 13/06/09)

5.2 PROTECCIÓN CATÓDICA EN PILOTES

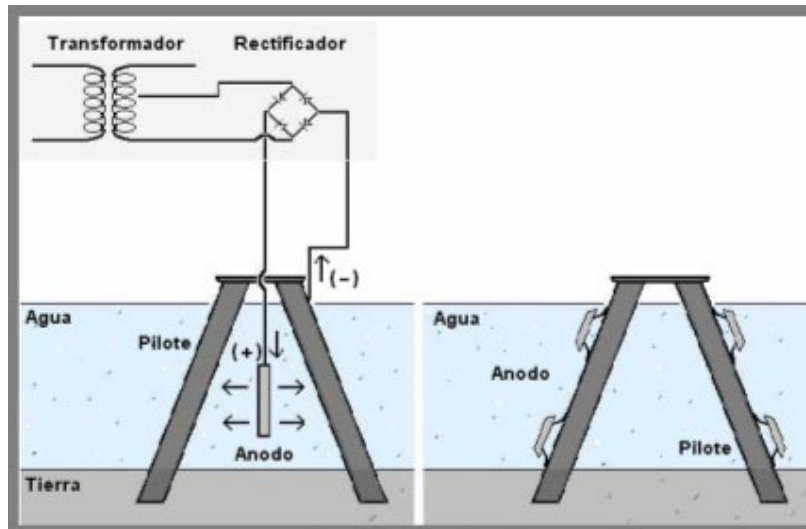
La protección catódica que se utiliza en pilotes es principalmente de 3 tipos: ánodos galvánicos o de sacrificio de zinc, ánodos galvánicos o de sacrificio de aluminio indio y ánodos de plomo antimonio plata (corriente impresa). Los ánodos de zinc se

recomiendan para estructuras desnudas tanto en agua de mar como en agua dulce, pero los de aluminio indio son más utilizados en muelles y tablestacas de puertos, ya que tienen mayor capacidad de corriente que los ánodos de zinc. Los ánodos de corriente impresa (plomo antimonio plata) son altamente recomendados para puertos, ya que la corriente que imprime es más flexible que la de los ánodos galvánicos, en el control de la corriente requerida y puede actuar a distancias apreciables, además, no necesitan mantenimiento, sólo se reemplazan al final de su vida útil. En la Figura 5.5 se muestra la diferencia entre la protección por corriente impresa y la protección galvánica.

En Puerto Limón, la protección catódica que se utiliza es galvánica. En la Figura 5.6 se observa uno de los ánodos utilizados para proteger el Muelle de Cruceros. Estos ánodos de sacrificio son de aluminio indio y su vida útil es aproximadamente de 10 años, sin embargo, al menos 1 vez al año debe de controlarse que los ánodos estén funcionando efectivamente, entregando la corriente necesaria para garantizar la protección contra la corrosión.

Estos ánodos de sacrificio se colocan después de que se hincan los pilotes, para lo cual se requiere de un soldador que realice este trabajo bajo el agua, aspecto que se ampliará más adelante.

FIGURA 5.5 PROTECCIÓN POR CORRIENTE IMPRESA Y GALVÁNICA



Fuente: http://www.corrotek.cl/pdf/proteccion_puertos.pdf (consultado el 19/10/2008)

FIGURA 5.6 ÁNODO DE SACRIFICIO UTILIZADO EN MUELLE DE CRUCEROS



Fuente: Constructora ANED

5.3 REPARACIÓN DE PILOTES

Cuando los pilotes de un muelle se enfrentan a la colisión de una embarcación o a un sismo, el punto definitivo para determinar si se requiere de una reparación o de una sustitución total del pilote es la deformación del mismo. En este caso, una inspección submarina, los desplazamientos medidos en sitio y el levantamiento de la geometría del pilote dañado se requieren como información básica para tomar la decisión.

En el caso de que el pilote pudiera ser reparado, se requieren los planos del muelle, para determinar los puntos de apoyo del sistema de apuntalamiento que se debe instalar mientras se realizan las reparaciones. En segundo lugar, se procede a cortar el tramo del pilote que se debe reparar para que éste recupere su integridad estructural.

En este apartado, es importante mencionar la necesidad de una buena soldadura submarina, ya que la unión entre el tramo del pilote antiguo y el nuevo debe ser de una alta calidad para que no se produzca un punto de falla del pilote.

La soldadura bajo el agua requiere del empleo de electrodos especiales que van impermeabilizados para que no se deterioren al sumergirlos en agua. Generalmente esta soldadura se realiza con electrodos de 4 o 5 mm. Algunos de los electrodos que presentan buenos resultados son *flexarc sw* de Westinghouse y *fleetweld 37* de Lincoln. Este tipo de soldadura debe ser realizada por un buceador especializado, que siga todas las normas de seguridad requeridas, como por ejemplo, que su cuerpo este totalmente aislado del equipo de soldadura y del agua, y que cuente con un ayudante en la superficie.

5.4 SUSTITUCIÓN TOTAL DE PILOTES

Generalmente, cuando la deformación del pilote, producto del impacto de una embarcación o debido a un sismo, se presenta desde el fondo marino se requiere una sustitución total del pilote. Esta acción se debe tomar con el fin de colocar el nuevo pilote en el mismo lugar donde se encontraba el anterior, para garantizar la estabilidad

estructural del nudo que conforma dicho pilote. Sin embargo, en muchos casos la extracción total del pilote requiere de maquinaria más compleja, y por lo tanto, resulta más factible realizar un estudio estructural del nudo en cuestión y desplazar el nuevo pilote algunos centímetros de su posición original. Es importante mencionar que el pilote dañado debe ser reemplazado por uno con características geométricas similares y con capacidad estructural similar o superior a la original. Además, el nuevo pilote debe contar con protección contra la corrosión, es decir, con recubrimiento de concreto y ánodos de sacrificio.

En el caso de la sustitución total de pilotes, se debe demoler la sección de losa y vigas que fue afectada por el deterioro ocasionado en el pilote. Luego se corta el pilote bajo el nivel de fondo y se extrae con ayuda de una grúa. En la Figura 5.7 se observa el pilote que fue extraído en el Muelle de Cruceros, para la reparación que se realizó en octubre del 2008. Es importante destacar que al momento de hincarse el nuevo pilote, no se puede colocar en el mismo lugar donde se encontraba el anterior, ya que a la hora de cortar el pilote, el buzo que realiza la labor siempre deja una pequeña altura de este para que en el momento de realizar el corte no se enturbie demasiado el agua, complicando la visibilidad.

FIGURA 5.7 EXTRACCIÓN DE PILOTE DAÑADO



Fuente: Fotografía facilitada por Constructora ANED

5.5 REMOCIÓN DE ADHERENCIAS MARINAS DE PILOTES

En Puerto Limón no se lleva a cabo la remoción de las adherencias marinas, sin embargo se recomienda que se tome en cuenta esta actividad, ya que como se mencionó en el Capítulo 3, algunas adherencias marinas segregan ácidos que pueden atacar los pilotes de acero y los agregados calizos del concreto. En la Figura 4.6 se observan la gran cantidad de organismos marinos que se adhieren a los componentes de un muelle.

Uno de los sistemas bastante efectivos para evitar el daño en los pilotes a causa de las adherencias marinas es el Sistema de Encapsulación Avanzada de Pilotes (A-P-E), el cual se utiliza además para la protección de los pilotes contra la corrosión.

Además, se pueden remover las adherencias marinas de una forma más simple, pero que requiere de mayor mantenimiento, y es mediante uno o varios buzos, que arranquen con cuchillas y cepillos los organismos que se adhieren a las estructuras portuarias.

5.6 REPARACIÓN DE VIGAS DEBIDO AL IMPACTO DE EMBARCACIONES

Cuando una embarcación impacta un muelle y daña las vigas, es importante realizar un estudio estructural del daño, y determinar la accesibilidad para realizar las operaciones de reparación. Generalmente la reparación requiere de la demolición del área dañada y la consecuente reconstrucción (ver Figuras 5.8 y 5.9). Cabe destacar que el manejo de los desechos de la demolición debe ser tratado de forma que se evite la contaminación ambiental. En la Figura 5.9 se observa como estos desechos son colocados en una balsa para luego llevarlos a un lugar determinado para desechos de construcción. En el

caso de Puerto Limón, existe un basurero de este tipo hacia el lado oeste de las bodegas, donde se llevan todos los desechos de construcción de las diferentes reparaciones que se han realizado a lo largo de los últimos años.

Para llevar a cabo las obras, en primera instancia es necesario establecer el andamiaje a utilizar, que por lo general son balsas y andamios cuyos puntos de apoyo están en el muelle. El acero de refuerzo de la nueva sección de la viga debe ir trasladado con el acero de refuerzo de las secciones existentes y en algunos casos, dependiendo del diámetro de la varilla, se puede realizar una junta soldada bien diseñada. El concreto a colocar debe cumplir con los mismos requerimientos de resistencia del concreto original de la viga y para evitar juntas frías se recomienda utilizar concretos sin retracción como el Sika Concrelisto RE-5000 o similar y algún material de liga, como algunos epóxicos. En la Figura 5.10 se observa el encofrado utilizado para el proceso de reparación en el Muelle de Cruceros.

FIGURA 5.8 REMOCIÓN DE ELEMENTOS DAÑADOS DEL MUELLE DE CRUCEROS



Fuente: Constructora ANED

FIGURA 5.9 DEMOLICIÓN DE ELEMENTOS DAÑADOS DEL MUELLE DE CRUCEROS



Fuente: Constructora ANED

FIGURA 5.10 ENCOFRADO UTILIZADO EN REPARACIÓN DEL MUELLE DE CRUCEROS



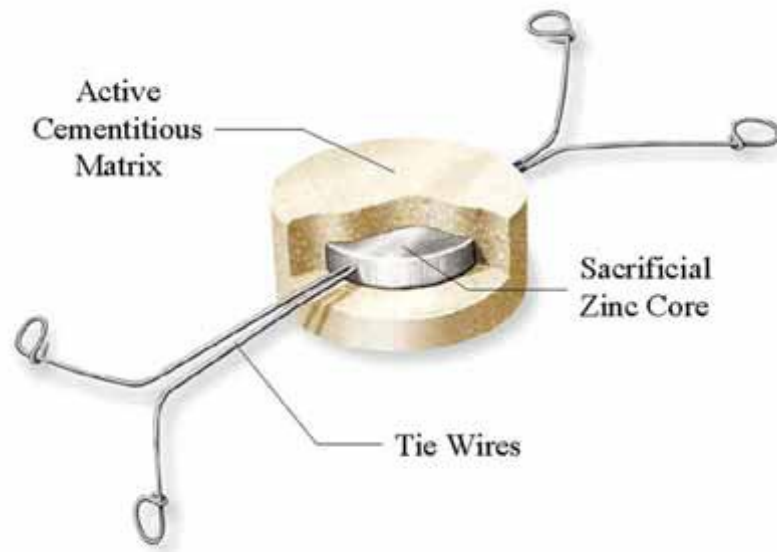
Fuente: Constructora ANED

5.7 UTILIZACIÓN DE ÁNODOS DE SACRIFICIO EN EL CONCRETO

Las vigas que componen la estructura de un muelle también pueden verse afectadas debido a las condiciones agresivas del medio. El concreto reforzado combina el acero (varillas) y concreto, en la cual este último brinda una protección contra la corrosión del acero. Actualmente, se han desarrollado ánodos de sacrificio discretos que se embeben dentro del concreto para prevenir la corrosión de la varilla de refuerzo.

Este sistema consiste en un ánodo galvánico embebido dentro del concreto, protegiendo las barras cercanas a las zonas donde se encuentra el concreto. Dichos ánodos están constituidos por un núcleo de zinc rodeado por una matriz activa de componentes cementantes; sus dimensiones más comunes son 63 mm de diámetro x 28 mm de alto (ver Figura 5.11); el ánodo galvánico es rápida y fácilmente asegurado con el acero de refuerzo. Una vez instalado, el núcleo de zinc se corroerá, ejerciendo la protección catódica al acero de refuerzo. Se ha indicado que estos ánodos proveen protección localizada contra la corrosión y que son efectivos en concreto contaminado con cloruro y carbonatado, son económicamente rentables, pues extienden la vida de servicio de 10 a 20 años, por reparaciones con parcheo en concreto; además son de fácil instalación, según la publicación técnica: *“Protección catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificio discretos”*, de Angélica del Valle Moreno y otros (2006). Sin embargo, tienen la limitación que sólo son adecuados para estructuras pequeñas, pues para grandes estructuras, el costo podría ser muy elevado.

FIGURA 5.11 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS ÁNODOS PUNTUALES



Fuente: Del Valle Moreno A. y otros

5.8 AUMENTO DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DE VIGAS

Para evitar la corrosión de las vigas es importante que todas cumplan con los requerimientos de espesor mínimo que establece el ACI 318, el cual es de 3 in. Para saber si una viga no cumple con este requerimiento, se pueden utilizar sensores de localización de refuerzo, sin embargo, lo más usual es picar para revisar, la cual tiene el inconveniente de que es una prueba destructiva. El procedimiento para aumentar el espesor de las vigas que no cumplen con el mínimo requerido depende del estado del acero de refuerzo. Si el refuerzo se encuentra en buenas condiciones se puede impermeabilizar el elemento con algún recubrimiento que se utilice como pintura impermeable y presente buena resistencia al ambiente salino. También se puede simplemente engrosar el elemento con concreto, siempre y cuando este cumpla con los mismos requerimientos del concreto original y se utilice algún producto para garantizar la adherencia del concreto nuevo con el viejo. Si el refuerzo se encuentra afectado, es

necesario limpiarle la corrosión y protegerlo con ánodos de sacrificio o bien sustituirlo completamente, para luego recubrir nuevamente.

5.9 INYECCIÓN Y RELLENO DE GRIETAS EN VIGAS Y LOSAS

El criterio para determinar si una grieta debe ser rellenada o inyectada radica en el lugar donde se encuentre y si esta grieta puede o no provocar debilitamiento estructural del muelle. Por ejemplo, cuando las grietas se encuentran en vigas, y su profundidad indica que el agua puede penetrar fácilmente hasta el refuerzo, es recomendable realizar una inyección. Cuando las grietas se encuentran por ejemplo en la losa de desgaste del muelle la inyección no es funcional cuando son una cantidad considerable de grietas, y en su lugar se debe realizar un relleno de grietas o bien la reconstrucción total del área agrietada. Además, antes de realizar el proceso de inyección o relleno de grietas se debe estudiar primero la causa de la aparición de las mismas.

El relleno de las grietas es una solución económica para evitar que éstas se expandan y que penetre la humedad hasta el acero, provocando corrosión. Para rellenar las grietas, primero se pica un par de centímetros a cada lado de la grieta, con el fin de asegurar que el epóxico o el mortero utilizado para rellenar la grieta penetren bien. Para estos casos, se pueden utilizar espumas expansivas o morteros especiales que sean fluidos, ligeramente expansivos, de altas resistencias mecánicas, con una excelente adherencia al concreto y al acero, y que resistan bien los golpes y vibraciones, lo cual es vital en los muelles.

5.10 RECONSTRUCCIÓN DE ÁREA AGRIETADA DE LOSAS

La primera recomendación cuando un área de la losa de un muelle presenta gran cantidad de grietas es demoler esa área, de lado a lado, en una franja que cubra todas

las grietas presentes, y proceder a su reconstrucción con un concreto que cumpla los mismos requerimientos del concreto original, pero en la mayoría de 280 kg/cm². Sin embargo, se debe tener presente que las juntas de expansión entre losas deben ser respetadas al momento de realizar la reconstrucción del área agrietada de las losas. Se recomienda que en las losas de desgaste (losas no estructurales) que no presentan refuerzo, se coloque malla electro soldada para dar mayor flexibilidad al concreto.

5.11 COLOCACIÓN DE RIELES EN SUPERFICIE DE CONCRETO DE RAMPAS RO/RO

El desgaste irregular de la superficie de concreto de las rampas Ro/Ro sucede debido a la fricción e impacto entre la plataforma de la embarcación y la superficie mencionada. Este desgaste se reparó colocando elementos metálicos como los rieles de una grúa, que fueron eliminados anteriormente y se tenían en bodega, en una cama de concreto de alta resistencia, con epóxicos y morteros expansivos, con un alto nivel de fluidez y alta resistencia mecánica. Además este epóxico debe ser autonivelante, con una excelente adherencia al concreto y al acero, buena resistencia a los golpes y ser impermeable. En la Figura 5.12 se observan rieles que ya fueron colocados, pero que aún no tienen la cama de concreto. Este procedimiento se llevó a cabo porque se contaba con estos elementos metálicos y para hacer la reparación más económica, sin embargo, se pueden colocar planchas metálicas ancladas a la superficie para evitar el desgaste, y que actúen de una forma similar a los rieles utilizados en esta ocasión.

FIGURA 5.12 RIELES COLOCADOS EN RAMPA Ro/Ro, EN MUELLE DE CRUCEROS



Fuente: Visita técnica realizada el 03/10/08

5.12 REEMPLAZO DE DEFENSAS

Cuando las defensas de cualquier tipo presentan grietas en el cuerpo de hule significa que ya han alcanzado su vida útil y por lo tanto deben ser reemplazadas. Para reemplazar toda la defensa, es necesario que una grúa sostenga la defensa mientras un operario en un andamio y amarrado con arnés al muelle, suelte los anclajes de la defensa al muelle. Cuando se va a colocar la nueva defensa, es necesario realizar el relleno del espacio donde se ubican los anclajes con algún epóxico o mortero expansivo, para garantizar una buena adherencia en la superficie de contacto entre la nueva defensa y la estructura del muelle. En la Figura 5.13 se muestra la remoción de una defensa en el Muelle 70.

FIGURA 5.13 REMOCIÓN DE DEFENSA EN EL MUELLE 70



Fuente. JAPDEVA

5.13 REEMPLAZO DE LÁMINAS DE DEFENSAS

El reemplazo de las láminas de las defensas depende de si se va a reemplazar la lámina entera o solamente algunas almohadillas de neopreno. Cuando se reemplaza la lámina entera se procede a sostener con una grúa o un montacargas la lámina, mientras que un peón, sostenido con arnés y en un andamio, suelta los tornillos de la lámina. Una vez suelta la lámina, la grúa la coloca en el muelle y se coloca en su sitio la nueva lámina. Cabe destacar que las láminas dañadas pueden ser reparadas y usadas nuevamente. Para cambiar las almohadillas no es necesario la grúa o el montacargas, ya que el operario en el andamio y con arnés puede hacer el cambio.

El reemplazo de las láminas de las defensas se debe llevar a cabo cuando el muelle o la zona de atraque no esté en uso, lo cual hace que este procedimiento que debe ser de mantenimiento no se de con la frecuencia requerida para evitar mayores daños a las defensas.

5.14 DRAGADO

La profundidad es el elemento básico de la infraestructura portuaria. Por esto el dragado o extracción de materiales del fondo del mar en los puertos es tan importante. Las operaciones de dragado deben cumplir una doble función: extraer el material y conducirlo hasta el lugar de descarga, con el cuidado de que al momento de realizar el dragado cerca de las estructuras portuarias éstas no se expongan de forma que se pueda comprometer su integridad estructural. La draga es la embarcación especialmente dispuesta para montar en ella las herramientas para extraer o excavar el material de los fondos marinos. Las dragas se clasifican en mecánicas e hidráulicas. Al primer grupo pertenecen las de grúa (con almeja, granada o garfios), las de cucharón y las de Cangilones o de Rosario. Estas presentan el problema que su alcance de descarga es muy limitado por lo que requieren de remolcadores para arrojar el material en las zonas de depósito. Sin embargo, dentro de este primer grupo, las dragas de Cangilones o de Rosario tienen un mayor rendimiento que las de grúa o cucharón, ya que su ciclo de trabajo es continuo. Por su parte, las dragas hidráulicas combinan la operación de extraer el material con el de su transporte hasta el lugar del depósito, mezclándolo con agua y bombeándolo como si fuera fluido. Estas últimas son mucho más económicas y eficientes que las mecánicas, pues realizan las dos operaciones en una unidad integral.

En Puerto Limón, para realizar trabajos específicos en los muelles se utilizan dragas mecánicas, y la zona de depósito por lo general cercana al muelle. Para realizar el

dragado general del puerto, se utilizan dragas hidráulicas. En la Figura 5.14 se observa la draga que actualmente se utiliza en Puerto Limón.

FIGURA 5.14 DRAGADO DE MANTENIMIENTO DE PUERTO LIMÓN



Fuente: JAPDEVA

Para ajustar el muelle a mayores requerimientos de calado es necesario un estudio preliminar de las profundidades de las estructuras del puerto, como pilotes y tablestacas y así determinar si el aumento de calado requiere de un refuerzo o ampliación de estas estructuras o simplemente se puede realizar el dragado hasta obtener el calado buscado. La diferencia entre el dragado de mantenimiento y el dragado para aumentar el calado estriba en que el dragado de mantenimiento busca eliminar sedimentos del fondo marino para mantener el calado actual del puerto. Por su parte el aumento de calado se realiza para que embarcaciones de mayor envergadura puedan atracar en el puerto.

En Puerto Limón, se llevó a cabo un estudio preliminar para aumentar el calado, pero este concluyó que en este puerto no es posible, debido a que si se retira el empuje pasivo que ejerce el fondo marino, el talud podría fallar, comprometiendo las estructuras de los muelles y del puerto en general.

En Puerto Limón, aumentar el calado no es primera necesidad, ya que actualmente se estudia la posibilidad de manejar toda la carga por Puerto Moín y dejar Puerto Limón como una terminal de cruceros exclusivamente. Los cruceros en general tienen un calado de menos de 12 m, con lo cual el la profundidad de calado actual de Puerto Limón es suficiente.

5.15 RELLENO DE ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES

Los patios de Puerto Limón se encuentran sobre un relleno hidráulico de arena, que debido al terremoto del 91 sufrió gran cantidad de asentamientos diferenciales debido a licuefacción. Para corregir esta situación es necesario remover los adoquines y reparar la base de la estructura de pavimento, para lo cual se deben retomar niveles y compactar la superficie antes de colocar nuevamente los adoquines.

En el caso del patio de contenedores, debido al sismo de 1991, se tuvo que realizar una reconstrucción total, ya que las consecuencias del sismo en este patio fueron muy severas.

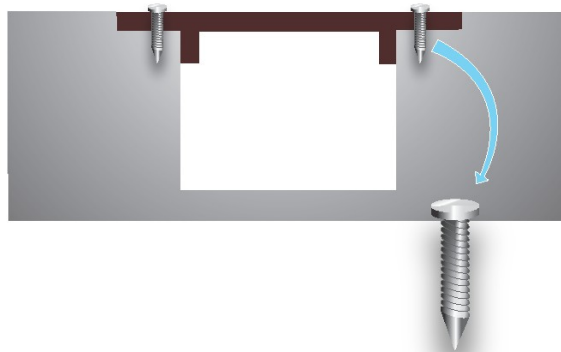
5.16 REMOCIÓN DE ADOQUINES DAÑADOS Y COLOCACIÓN DE NUEVOS ADOQUINES

Los patios de Puerto Limón se encuentran adoquinados, sin embargo sufren daños en su superficie de rodamiento debido a las cargas de los contenedores que se manejan. Cuando los adoquines fallan y presentan grietas se procede a remover los adoquines dañados y sustituirlos por adoquines nuevos.

5.17 FIJAR PARRILLAS A BASE SOPORTE

Los patios de Puerto Limón presentan un problema en las obras de drenaje fluvial: las parrillas que los cubren tienden a levantarse con el paso de los contenedores, representando un peligro. Estas parrillas se encuentran simplemente apoyadas sobre las obras de drenaje. Una de las propuestas que se presentan es la de empotrar tubos en una cama de concreto y acortar los tramos que requieren parrilla. Sin embargo, esta propuesta presenta el inconveniente que los puntos de registro se ven distanciados y la limpieza de estas obras de drenaje se ve comprometida. Por este motivo, se propone empernar los extremos de las parrillas en sus puntos de apoyo en el concreto (ver Figura 5.15), y a la hora de realizar la limpieza, se verifica el buen estado del anclaje.

FIGURA 5.15 PARRILLAS EMPERNADAS EN SUS EXTREMOS



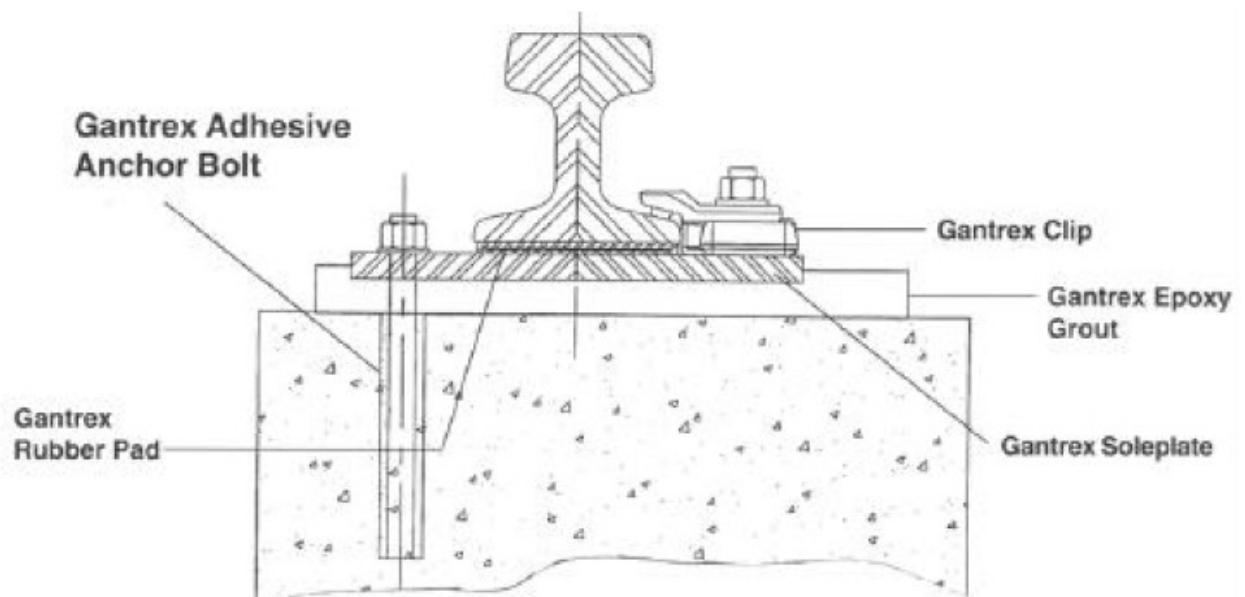
Fuente: La autora

5.18 DESALINEAMIENTO DE RIELES DEBIDO A SISMOS

Debido al sismo de 1991, los sistemas de rieles de las grúas del Muelle Alemán quedaron totalmente destruidos, de forma que la grúa no podía ser utilizada pues las

deflexiones excedieron las tolerancias permitidas. Esta situación es bastante compleja de corregir pues requería de una reconstrucción total. En primera instancia, se removió el riel original, el cual por ductilidad volvió a su posición original, se reutilizó y se realizaron las reparaciones necesarias para que la grúa pudiera entrar de nuevo en funcionamiento. El riel va colocado sobre una placa de acero anclada con pernos, sobre una cama de mortero epóxico, con abrazaderas que se ajustan al riel. (ver Figura 5.16)

FIGURA 5.16 SISTEMA DE RIEL DE GRÚA UTILIZADO EN EL MUELLE ALEMÁN



Fuente: Ficha técnica Gantrex

Además del sistema de rieles, se tuvo que reparar el canal de protección para el sistema de alimentación eléctrica, el cual es un canal de acero inoxidable donde se

coloca el cable de alta tensión de la grúa portacontenedores. Sobre el ducto y a manera de tapa, se coloca una banda de hule reforzada de protección para el canal y que debe tener una rigidez de manera que permita el paso de todo tipo de vehículos, sin sufrir deformación alguna.

5.19 PROTECCIÓN DEL ROMPEOLAS

El objetivo de un rompeolas es establecer una zona de mar en calma para que la infraestructura portuaria y las embarcaciones no se vean afectadas por el oleaje. Es, por lo tanto, importante que el rompeolas sea capaz de soportar el impacto de las olas propias de la zona. El rompeolas de Puerto Limón es de enrocamiento, y según mencionan los ingenieros de JAPDEVA, antes del terremoto del 91 el oleaje era más fuerte, por lo cual en una ocasión tuvieron que realizar una sustitución del material del rompeolas con piedra, para evitar que el daño fuera mayor, sin embargo, desde 1991 no se presentan problemas en el rompeolas, ya que la ola de diseño es mucho mayor a las olas que se presentan en la actualidad.

Sin embargo, en caso de daño, existen varios tipos de dolos que se pueden utilizar para llevar a cabo reparaciones en los rompeolas. Entre ellos se encuentra dolos tipo cubo, tetrápodos, etc. En el mercado, la empresa Delta Marine Consultants ofrece un tipo de dolo llamado XBLOC, el cual ofrece gran cantidad de beneficios como los son una gran estabilidad hidráulica, capacidad de trabazón automática, bajo volumen de rebalse, debido a la gran porosidad del manto y grandes beneficios económicos, pues reducen la cantidad necesaria de concreto. En la Figura 5.17 se observa la forma de este tipo de dolos y en la Figura 5.18 se observa un ejemplo de su aplicación.

FIGURA 5.17 XBLOC



Fuente: <http://www.xbloc.com>

FIGURA 5.18 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE XBLOC



Fuente: <http://www.xbloc.com>

En este último capítulo se estudiaron procedimientos constructivos aplicables a los daños encontrados en la infraestructura portuaria de Puerto Limón. Cabe resaltar que estos procedimientos no son las únicas opciones para los daños y se abre la posibilidad para futuros proyectos de graduación de ampliar el tema e incluir estudios económicos y financieros de las distintas soluciones constructivas.

6 CONCLUSIONES

El Complejo Portuario Moín - Limón es de gran importancia para la economía nacional, pues por acá se maneja cerca del 80% de las importaciones y exportaciones del país, y atracan más de 100 cruceros por año. Específicamente, Puerto Limón recibe productos como: hierro, productos químicos, fertilizantes, vehículos y repuestos, además de los cerca de 200 mil pasajeros que llegan en cruceros. En cuanto a los productos que se exportan por Puerto Limón encontramos que los de mayor importancia son: café, verduras y otros. El comercio exterior y el turismo son vitales para la economía del país, y Puerto Limón es una puerta para potenciar estas actividades, ayudando a mejorar la economía nacional.

La infraestructura de todo puerto se compone por: muelles, obras de abrigo como los rompeolas, patios, caminos, edificios y bodegas. En este proyecto se estudiaron los daños en los muelles, rompeolas, patios y caminos, dejando de lado el estudio de edificios y bodegas.

La infraestructura de Puerto Limón no sólo debe enfrentarse a las agresiones de un medio marino, sino que también a condiciones ambientales muy agresivas como las altas temperaturas, altas precipitaciones y altos niveles de humedad. Estas condiciones intensifican la vulnerabilidad de las estructuras ante daños como la corrosión. Además, al momento de realizar la planificación de las reparaciones, las condiciones ambientales deben considerarse, ya que la eficiencia en las actividades se puede ver afectada.

En términos generales, la infraestructura de Puerto Limón se encuentra en buenas condiciones, exceptuando el Muelle 70, que como se expuso en el proyecto, tiene su vida útil excedida y condiciones de atraque limitadas debido a las embarcaciones hundidas en su costado oeste.

Debido a las condiciones agresivas del medio ambiente, la infraestructura portuaria se ve sometida a daños como la corrosión, la cual se intensifica según sea la zona donde

se encuentre la estructura en estudio. Por ejemplo, las estructuras como los pilotes que se encuentran en las zonas: sumergida, de marea y de salpicadura deben ser tratados de diferente forma para cada zona. Así, en la zona sumergida, los pilotes metálicos deben protegerse contra la corrosión galvánica, generalmente con ánodos de sacrificio de aluminio indio que tienen una vida útil aproximada de 10 años. En la zona de mareas y salpicadura se utilizan encamisados de concreto o fibra de vidrio para proteger contra la corrosión, principalmente en la zona de salpicaduras, que es donde el proceso de corrosión sucede más rápidamente.

Otro factor ambiental que afecta las estructuras portuarias que se encuentran en la zona sumergida son las adherencias marinas, las cuales pueden segregar ácidos que corroen las superficies de acero y atacan los agregados calizos, disminuyendo la resistencia del concreto.

Las estructuras que se encuentran en la zona de ambiente marino también presentan daños por corrosión, como las vigas y losas de los muelles. Cuando estos elementos son de concreto, por las grietas se puede filtrar agua, iniciando el proceso de corrosión en el acero de refuerzo y ocasionando la laminación de este y la consecuente pérdida de capacidad estructural del elemento. Para evitar este daño, se recomienda rellenar las grietas presentes con un producto con una consistencia favorable para esta aplicación, con excelente adhesión al concreto y al acero, no abrasivo, entre otras características. Cuando las grietas cubren un área considerable, es preferible en vez de la inyección, reconstruir el área agrietada con un concreto que cumpla los mismos requerimientos del concreto original.

La operación normal del puerto puede producir daños en la infraestructura, los cuales deben ser corregidos a tiempo para evitar que aumenten en magnitud y severidad. Por ejemplo las defensas de los muelles son los elementos que más sufren daños por la operación normal del puerto, ya que las almohadillas de neopreno de la lámina tienden a desprenderse, la lámina también puede dañarse y el cuerpo de hule puede presentar grietas o sus anclajes se pueden aflojar. Para reparar los daños en las defensas, solo

es necesario contar con una cuadrilla de unos 3 o 4 peones para que con la ayuda de una grúa o un montacargas procedan a cambiar la defensa entera o la parte que requiere reemplazo.

Otro daño común debido a la operación normal de puerto es el desgaste en las rampas Ro/Ro, debido a la fricción que se genera entre la plataforma de la embarcación y la superficie mencionada. Para reparar este daño, es posible colocar elementos metálicos, en una cama de concreto de alta resistencia, con epóxicos y morteros expansivos.

Eventos especiales como el choque de embarcaciones y los sismos también deben ser considerados en el inventario de daños de la infraestructura portuaria, ya que si bien su incidencia no es muy seguida, los daños que ocasionan pueden ser de una severidad muy alta. Por ejemplo, pilotes y vigas pueden ser dañados por el choque de embarcaciones, ocasionando pérdida de capacidad estructural de los muelles. Para el caso de los pilotes, se debe realizar un levantamiento mediante inspección submarina, de la geometría del pilote después del impacto, para evaluar si el pilote puede ser reparado o debe ser sustituido en su totalidad. La reparación de pilotes se da cuando el punto de deflexión del pilote se encuentra aproximadamente de la mitad hacia arriba, de forma que se pueda realizar un corte y la consiguiente soldadura submarina del nuevo tramo del pilote. Cuando el punto de deflexión está muy profundo, se requiere de la sustitución total del pilote.

En el caso de las vigas, se requiere de un estudio estructural, con el fin de evaluar la integridad estructural del muelle. Cuando el daño es muy severo, se requiere demoler el área dañada y reconstruirla, manejando los desechos de la demolición con conciencia ambiental, traslapando el acero de refuerzo viejo con el nuevo y utilizando un concreto sin retracción, que cumpla con los mismos requerimientos del original y utilizando algún material de liga para evitar las juntas frías.

Los sismos por su parte tienen el potencial para dañar cualquier elemento de la infraestructura portuaria. En el caso de Puerto Limón y el sismo ocurrido en abril de 1991, los daños fueron variados y de gran magnitud. El puerto tuvo una pérdida de

calado de 0,8 m, los caminos y patios sufrieron asentamientos diferenciales debido a la licuefacción de los suelos, se deformaron los rieles de las grúas del Muelle Alemán y vigas y pilotes vieron comprometida su integridad estructural. Para reparar los daños ocasionados por este sismo, se tuvieron que llevar a cabo varias acciones entre ellas, rellenar los asentamientos diferenciales ocasionados en caminos y patios, reparar los pilotes y vigas dañados. Sin embargo, el desalineo de los rieles de las grúas no es posible corregirlo en su totalidad, y hasta la fecha, los efectos de este terremoto en esta estructura son apreciables.

Del inventario de daños en infraestructura portuaria realizado para Puerto Limón, se observó que la situación del Muelle 70 es crítica, ya que la mayoría de sus pilotes presentan corrosión a unos niveles muy altos, la mayor parte de sus defensas se encuentran dañadas y requieren reemplazo, su losa presenta problemas severos de agrietamiento, y su costado oeste es completamente inutilizable. Por su parte, el Muelle de Cruceros, el Muelle Alemán, el Muelle de Remolcadores y las rampas Ro/Ro se encuentran en muy buen estado, presentando daños como defensas dañadas y unidades de losas que requieren reemplazo, pero que con un adecuado mantenimiento se asegura la óptima funcionalidad de estas estructuras. Se observó también que se debe brindar atención a la adherencia de organismos marinos en los pilotes, y a la inspección del recubrimiento de las vigas, pues no se tienen datos de estos detalles. Evaluar el daño que producen las adherencias marinas es importante ya que estos pueden comprometer la integridad estructural de los pilotes y revisar los espesores de recubrimiento de las vigas es una práctica sana para evitar la aparición de grietas que pueden producir laminación del acero de refuerzo.

7 FUENTES CONSULTADAS

Bibliografía:

- 1) Álvarez Molina, Gustavo. *“Análisis de: Estado actual, Factibilidad Reconstructiva y Futuro Estado de Servicio del Muelle Setenta, Puerto Limón”*. Trabajo de graduación. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. Julio, 1985.
- 2) Arrieta Brenes; Pérez Estrada; Wilshire McKenzie. *“Evaluación de las operaciones portuarias y su infraestructura para proponer un modelo que incremente los rendimientos en los puertos de Limón – Moín”*. Trabajo de graduación. Escuela de Administración Portuaria, Universidad de Costa Rica, Sede de Limón. Diciembre 2000.
- 3) Ben C. Gerwick, Jr. *“Construction of Marine and Offshore Structures”*. Tercera edición. CRC Press. California, USA.
- 4) Camacho y Mora S.A. *“Estudio de daños ocasionados por colisión en Muelle de la Terminal de Pasajeros y recomendaciones para su rehabilitación”*. Costa Rica, 2005
- 5) Del Valle Moreno, A. y otros. *“Protección catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificio discretos”*. Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 290. México, 2006.
- 6) Departamento de Planificación General y Estadísticas, JAPDEVA. *Anuario Estadístico 2007*.

- 7) GANTREX. Ficha técnica: *Adhesive anchor bolts for crane rail on concrete applications*. USA, 2003
- 8) González de la Cotera. *“Corrosión del concreto en ambiente marino”*. Exposición del ciclo de conferencias magistrales del I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción. American Concrete Institute. Capítulo Peruano. 1998
- 9) Ing. José Manuel Camacho. *“Estudio de Ingeniería para la Rehabilitación del muelle 70 y Rampa para Remolcadores”* Costa Rica, 2008
- 10) JAPDEVA. Cartel de licitación abreviada: *“Compra de defensas marinas para los muelles de Limón”*. Limón, 2009
- 11) JAPDEVA. Cartel de licitación: *“Suministro de materiales, equipo y mano de obra para la instalación de rieles y el sistema de ducto de alta tensión de la grúa portacontenedores del Puerto Moín”*. Limón, Costa Rica, 2008
- 12) Macdonel Martínez, Guillermo y otros. *“Ingeniería Marítima y Portuaria”*. Alfaomega Grupo Editor. Bogota, Colombia. 2000
- 13) Quesada Carvajal, Carlos. Transporte Marítimo. Curso: *“Valuación de terminales portuarias y marítimas”*. Maestría en Valuación. Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. 2000
- 14) Tecnosagot S.A. *“Metalización. Opción de control de la corrosión”*. San José, Costa Rica. 2009

15) Villegas Ruiz, Greivin; Chaves Camacho, Jose Francisco. *“Propuesta de un Plan Director para una terminal de Megacruceros en Puerto Limón”*. Trabajo de graduación. Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Agosto, 2002.

Páginas consultadas en Internet:

16) BASF, The Chemical Company. *“Proceso de Encapsulación Avanzada de Pilotes. Control de la corrosión y reparación estructural”*. América Latina, 2009

<http://www.southamerica.basf-cc.com/paises/latin%20america/folletos/apecturebasf0906.pdf>

17) BASF, The Chemical Company. *“Soluciones para la reparación y saneamiento de hormigón en contacto con aguas residuales urbanas y agua de mar”*. América

Latina, 2009 <http://www.southamerica.basf-cc.com/paises/Chile/folletos/folleto%20reparaci%C3%B3n.pdf>

18) Bermúdez; Alaejos; Lanza. *“La corrosión del hormigón armado en ambiente marino: contenido crítico de cloruros”*. Laboratorio Central de Estructuras y

Materiales. Madrid, España. <http://ingenierosdeminas.org/documentos/06-Materias%20primas%20de%20interes%20industrial.-6.pdf>

- 19) Corrotek. Corrosión Integral y Tecnología. "Corrosión en pilotes". Boletín Técnico BT-11. Santiago, Chile. Noviembre, 2003. http://www.achcorr.cl/BT-11Corrosion_en_Pilotes_JORGE.pdf
- 20) Corrotek. Corrosión Integral y Tecnología. "Protección catódica por corriente galvánica". http://www.corrotek.cl/pdf/proteccion_puertos.pdf
- 21) Google Earth: Puerto Limón, Costa Rica. <http://earth.google.es/>
- 22) Instituto Meteorológico Nacional <http://www.imn.ac.cr/IMN>
- 23) Lavell Thomas, Allan. "El terremoto de Limón, abril 22 de 1991: Vulnerabilidades sociales, económicas e institucionales". San José, Costa Rica. Julio, 1992. http://www.crid.or.cr/crid/CD_CNE/pdf/spa/doc495/doc495.htm
- 24) Página de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. Corrosión. 2009 www.construmatica.com/construpedia
- 25) Página electrónica de JAPDEVA: <http://www.japdeva.go.cr/frtlim.htm>
- 26) Página electrónica de la ARESEP: "Puertos de Costa Rica" www.aresep.go.cr/docs/Puertos_CR.pdf

- 27) Página electrónica de la Red Sismológica Nacional UCR-ICE. “*Terremoto de Limón*”. Abril, 1991. www.rsn.geologia.ucr.ac.cr/00%20Sismos%20hist%F3ricos/Limon%2022-04-1991.htm
- 28) Página electrónica del Estado de la Nación: *Estadísticas económicas (2001-2005)* http://www.estadonacion.or.cr/Compendio/eco_comextur01_05.htm
- 29) Programa gratuito de predicción de mareas. www.wxtide32.com
- 30) *Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM)*. Capítulo 2: Criterios generales de proyecto. Puertos del Estado. España, 1990
http://www.puertos.es/export/download/ROM_PDFs/ROM0290_2.pdf
- 31) Sika. *Guía de productos*. 2009.
http://issuu.com/sika/docs/guia_de_productos_2009_sika?mode=embed&layout=http%3A%2F%2Fskin.issuu.com%2Fv%2Fflight%2Flayout.xml&showFlipBtn=true
- 32) Vico; Morris; Vázquez. “*Durabilidad del hormigón en ambiente marino. Vida útil de distintos recubrimientos de armaduras*”. División Corrosión. INTEMA. Universidad Nacional de Mar de Plata. Argentina, 2001. <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/posadas/trabajos/0813.pdf>

33) Xbloc. *“Protección eficiente contra el oleaje en diques, rompeolas y líneas de costa”*. <http://www.xbloc.com/upload/downloads/Xbloc%20folleto%20espanol.pdf>