

ISSN 0188-7297



INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE



Certificación ISO 9001:2008 Ú

Determinación del estado de corrosión y capacidad de carga de los muelles del puerto de Guaymas

Angélica del Valle Moreno
Manuel de Jesús Fabela Gallegos
José Ricardo Hernández Jiménez
David Vázquez Vega
Andrés Torres Acosta
Jorge Terán Guillén
Miguel Martínez Madrid

**Publicación Técnica No. 336
Sanfandila, Qro, 2011**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Determinación del estado de corrosión y capacidad
de carga de los muelles del puerto de Guaymas**

**Publicación Técnica No. 336
Sanfandila, Qro, 2011**

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte por la Dra. Angélica del Valle Moreno, el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos, el M. C. José Ricardo Hernández Jiménez, el M en C. David Vázquez Vega y el Dr. Jorge Terán Guillén.

Se agradece la colaboración del Dr. Andrés Torres Acosta, Encargado del Área de Materiales y del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural.

Índice

Resumen	vii
Abstract	ix
Resumen ejecutivo	xi
Introducción.....	1
1 Antecedentes	3
1.1 Generalidades del Puerto de Guaymas	3
1.2 Estructura del muelle	4
2 Evaluación de la estructura	9
2.1 Alcance de la evaluación	9
2.2 Ensayes efectuados y ubicación.....	9
2.2.1 Plan de Pruebas de carga	16
2.2.2 Medición de Vibraciones.....	23
3 Resultados de la evaluación	25
3.1 Resistencia a compresión y módulo de elasticidad	25
3.2 Ensayes esclerométricos.....	27
3.3 Pruebas de adherencia.....	28
3.4 Detección de armados.....	29
3.5 Profundidad de carbonatación.....	30
3.6 Contenido de cloruros.....	34
3.7 Contenido de sulfatos.....	38
3.8 Potencial de corrosión.....	39
3.9 Identificación de daños.....	41

3.10	Relación esfuerzo-deformación	46
3.11	Estimación de límites de deformación	47
3.12	Pruebas de carga.....	48
3.13	Vibración	56
4	Conclusiones y Recomendaciones	67
4.1	Discusión general	67
4.2	Resistencia del concreto.....	69
4.3	Contaminación del concreto	70
4.4	Potencial de corrosión	71
4.5	Pruebas de carga	71
4.6	Reparación de daños.....	72

Resumen

Las condiciones ambientales, la magnitud e intensidad de operaciones de carga y descarga, así como la ocurrencia de eventos climatológicos extraordinarios, afectaron la integridad estructural del muelle de Guaymas, lo que generó incertidumbres sobre su capacidad de soporte.

Se realizaron ensayos electroquímicos para determinar el estado de corrosión y se ejecutaron pruebas de carga sobre los tramos del muelle con la técnica de extensometría eléctrica. Se usaron transductores de desplazamiento y mediciones de vibración.

20% de las pilas se debían rehabilitar reemplazando el acero y 48% mediante limpieza del acero, ambas con reposición del concreto. El muelle requiere la instalación de un Sistema de Protección Catódica en todas las pilas.

Debido a la heterogeneidad del concreto, los límites estimados de manera conservadora fueron 1226 $\mu\delta$ (microdeformaciones) a compresión y 86 $\mu\delta$ a tensión, una estimación menos estricta incrementó estos valores en un 50% (1850 $\mu\delta$ a compresión y 130 $\mu\delta$ a tensión).

Los resultados de deformación mostraron que los tramos 2 y 3, poseen una mayor capacidad de carga que los tramos 4, 5 y 6. Sin embargo, las mediciones de vibración mostraron que el 2 comparte susceptibilidad de movimiento vertical y horizontal, mientras que los restantes son más sensibles a movimiento vertical.

Abstract

Environmental conditions, the magnitude and intensity of loading and unloading operations, as well as the occurrence of extraordinary climatic events, affected the structural integrity of the API Guaymas port pier. These generated uncertainty in the pier's administrators about their load bearing capabilities. To offset the damage of slabs and piles of some pier sections, rehabilitation and repair processes were undertaken. However, these were done in such a way that they did not provide the benefits of appropriate structural strength, promoting additional deterioration conditions.

At present time, the pier structures exhibit several indications of damage such as cracks and fractures in slabs and piles, visible collapse of adjacent parts to the docking sections, as well as signs of corrosion of steel reinforcement in much of the structure. The Guaymas API administrators expressed interest in determining the actual load bearing capacity of the sections 2, 3, 4, 5 and 6 of the pier.

A set of activities were designed to determine the corrosion status by electrochemical and structural tests, by running load tests on the various sections. The later were done primarily applying extensometric techniques to the pier to measure stresses produced by applied loads, without considering the previous states of strain and stress. Likewise, displacement transducers were used to estimate relative movements between sections of the structure. Vibration measurements were ran to infer behavior on the sections as a whole.

The determination of critical unit deformation limits were obtained from values of the compressive strength and elasticity modulus, resulting from the mechanical tests of concrete samples taken from pier's structure. Due to the concrete heterogeneity, the limits were estimated conservatively at 1226 $\mu\delta$ and only 86 $\mu\delta$ in tension, while a less strict estimate increased these values by 50 per cent (1850 $\mu\delta$ to compression and 130 $\mu\delta$).

Globally, the deformation results showed that the sections 2 and 3, have a greater load capacity than the sections 4, 5 and 6. However, vibration measurements showed that section 2 shared susceptibility of both vertical and horizontal movement, while the remaining sections are more sensitive to vertical movement. In general, physical and environmental conditions of the area where the Pier is located, as well as the sections operation activities, may affect the capacity current status of these sections.

The project included rehabilitation recommendations to the Port administrator. These specifications were done to rehabilitate 20% of the piles by replacing the

corroded steel reinforcement and the damaged concrete, and 48% of the piles were repaired by just cleaning the rebar surface and replacing the damaged concrete section. 32% of the piles did not require immediate intervention.

The Pier also required the installation of a cathodic protection system by sacrificial anodes, including the piles that did not required immediate intervention.

Resumen ejecutivo

El puerto de Guaymas, en la costa del estado de Sonora, está a cargo de la Administración Portuaria Integral de Guaymas, S. A. de C. V. (API GUAYMAS), con movimientos importantes de ácido sulfúrico, mineral y productos agrícolas a granel. Los muelles, administrados por API GUAYMAS, constan de varios tramos de atraque con calados desde 3 m hasta 13 m, los más profundos. Los tramos, contruidos de concreto hidráulico reforzado con acero, están dispuestos en dos bandas, la Banda Este, compuesta por los tramos 1 a 4, y la Banda Sur, compuesta por los tramos 5 y 6.

Las condiciones ambientales, la magnitud e intensidad de operaciones de carga y descarga, así como la ocurrencia de eventos climatológicos extraordinarios, han afectado la integridad estructural del muelle, lo que generó incertidumbres sobre sus capacidades de soporte. Para contrarrestar el daño de losas y pilotes de algunos tramos del muelle, se han aplicado algunos procesos de rehabilitación y reparación. No obstante, los trabajos previos fueron ejecutados de manera que no proporcionaron las ventajas de resistencia estructural adecuados, promoviendo, incluso, condiciones adicionales promotoras de deterioro.

Actualmente, las estructuras del muelle exhiben diversos indicios de daño, como grietas y fracturas en losas, pilas y pilotes, hundimiento visible de partes adyacentes a los tramos de atraque, así como signos evidentes de corrosión del acero de refuerzo en gran parte de la estructura. Esta situación requirió de una mayor atención a las condiciones de operatividad del muelle, cuestionando la integridad estructural del mismo. Por tanto, API GUAYMAS expresó su interés en que se determine la capacidad real actual de soporte de los tramos 2, 3, 4, 5 y 6 del muelle.

Atendiendo ese interés, se realizaron un conjunto de actividades encaminadas a determinar el estado de corrosión y estructural del muelle. Las pruebas mecánicas, químicas y electroquímicas realizadas fueron: Identificación y caracterización de daños, determinación de las características mecánicas del concreto mediante pruebas de resistencia a la compresión de núcleos y obtención del módulo elástico, índices esclerométricos y ensayos de resistencia a tensión por adherencia, determinación del grado de contaminación interna en el concreto mediante pruebas de carbonatación, contenido de cloruros y contenido de sulfatos, verificación de la concordancia entre la información documental y la estructura real, así como la medición de espesores de recubrimiento, mediante el uso de equipo de detección del acero de refuerzo y determinación del potencial de corrosión en diferentes áreas.

La ejecución de pruebas de carga sobre la estructura de los diversos tramos que componen el muelle de API Guaymas, tuvo el propósito de identificar las condiciones de su capacidad estructural. Por tanto, se instrumentaron diversos puntos en cada uno de los tramos, aplicando principalmente la técnica de

extensometría eléctrica para medir los esfuerzos producidos por cargas aplicadas, sin considerar estados de deformación y esfuerzo previos.

Sensores de deformación (extensómetros) fueron colocados en pilas, pilotes, trabes y losa en los distintos tramos. Así mismo, se colocaron en algunos puntos transductores de desplazamiento para inferir movimientos relativos entre partes de la estructura de los tramos. De manera complementaria se realizaron mediciones de vibración para inferir el comportamiento en conjunto de los tramos. Las pruebas fueron realizadas aplicando carga vertical por medio de un camión unitario de carga pesada de tres ejes, cargado con material a granel a su máxima capacidad. El vehículo se hizo circular en diferentes trayectorias rectas a lo largo de los tramos, complementada en algunos casos con maniobras de frenado. Para simular la carga cuasiestática, el camión se hizo circular a velocidades muy bajas, alrededor de 2 km/h, siguiendo las trayectorias por encima de las zonas instrumentadas en cada tramo. Así mismo, para inferir el efecto de la velocidad de operación típica sobre el muelle, en otra serie de pruebas el camión se desplazó a una velocidad aproximada a los 12 km/h. Por otro lado, las mediciones de vibración se realizaron sobre vitas cercanas a las zonas de instrumentación, haciendo circular el vehículo a velocidad aproximada de 12 km/h a lo largo del tramo.

La determinación de límites críticos de deformación unitaria partió de valores de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad, resultantes de las pruebas mecánicas de muestras de concreto obtenidas de la estructura del muelle. Tanto la resistencia a la compresión como el módulo de elasticidad, mostraron gran heterogeneidad del concreto actual del muelle. Esto fue producto de la aplicación de diversos procesos de rehabilitación previos que, a su vez, reflejaron defectos constructivos en la estructura del muelle. Estos defectos participan en las condiciones de deterioro estructural del muelle, principalmente en los tramos 3, 4, 5 y 6. De acuerdo a la heterogeneidad, los límites fueron estimados de manera conservadora en 1226 $\mu\delta$ (microdeformaciones) a compresión y sólo 86 $\mu\delta$ a tensión, mientras que una estimación menos estricta incrementó estos valores en un 50% (1850 $\mu\delta$ a compresión y 130 $\mu\delta$ a tensión).

Las mediciones de deformación unitaria relativa resultaron con menores niveles los tramos 2 y 3, con variaciones máximas de 54 $\mu\delta$ y 38 $\mu\delta$ respectivamente. Las variaciones en los tramos 3, 4 y 5 fueron correspondientemente de 89 $\mu\delta$, 159 $\mu\delta$ y 89 $\mu\delta$, valores por arriba del límite conservador de deformación crítica a tensión. Deformaciones a tensión se presentaron principalmente en trabes y losa, mientras que en pilas y pilotes fueron mayormente de compresión. De manera global, los resultados de deformación mostraron que los tramos 2 y 3, poseen una mayor capacidad de carga que los tramos 4, 5 y 6. Sin embargo, las mediciones de vibración mostraron que el 2 comparte susceptibilidad de movimiento vertical y horizontal, mientras que los restantes son más sensibles a movimiento vertical. En general, las condiciones físicas y ambientales de la zona donde se ubica el recinto, así como las actividades de operación sobre los tramos, pueden afectar la condición actual de la capacidad de estos tramos.

Introducción

La degradación de las estructuras de concreto-metal, en las que la participación del medio ambiente local es determinante, es un fenómeno muy común en las zonas costeras. La presencia de sales, aire y altas concentraciones de humedad propician condiciones para que el acero, material común de refuerzo en estructuras de concreto, experimente cambios de tipo electroquímico, dando lugar al fenómeno de corrosión.

Debido a la baja resistencia a la tensión del concreto hidráulico, el acero de refuerzo es un material que se incluye en forma de barras o varillas que, durante el fraguado, se anclan internamente en el concreto. Así, la combinación concreto-metal adquiere una mayor resistencia a la tensión, incrementando la diversidad de aplicaciones del concreto en estructuras.

Sin embargo, la exposición de estas estructuras a ambientes agresivos, como es el caso de los puertos marítimos, conducen a estados de corrosión cuyo efecto puede tener cierto grado de severidad. La corrosión, como proceso de degradación electroquímico, disminuye no sólo las propiedades del acero, sino la capacidad estructural del concreto hidráulico.

Debido a los productos químicos de la corrosión sobre la superficie de la varilla de acero de refuerzo, se reduce el anclaje entre varilla y concreto, perdiéndose gran parte de la capacidad estructural de la combinación concreto-varilla. Además, por su mayor volumen y su condición de confinamiento, estos productos generan presiones internas capaces de romper el concreto, produciendo fracturas, grietas, delaminaciones y otros defectos que merman la capacidad de soporte mecánico de la estructura. Estos efectos pueden agravarse si la estructura es sujeta a operaciones intensas o condiciones de trabajo extraordinarias, así como a la falta de eficacia de las labores de mantenimiento, conservación o reparación.

Las necesidades de crecimiento al paso de los años del puerto de Guaymas, en la costa del estado de Sonora, requirieron que de manera artificial se extendiera una zona de tierra firme sobre el mar en una porción de la bahía, facilitando el desarrollo de muelles de atraque para barcos de gran calado. Estos muelles consisten básicamente de una serie de losas de concreto hidráulico reforzado con acero, soportadas por pilas y pilotes apoyados en el lecho marino.

Dada la importancia comercial y económica del puerto en la región, la Gerencia de Operaciones e Ingeniería de la Administración Portuaria Integral (API), preocupada por mantener en óptimas condiciones su infraestructura, solicitó al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) llevar a cabo una evaluación por durabilidad de la estructura de los muelles 2 al 6 del puerto, que sirvieran de base para el desarrollo de un proyecto de rehabilitación integral.

Este informe está constituido por dos partes: la referente a los estudios de corrosión y la relativa a la determinación de la capacidad de carga de cada una de las estructuras de las principales posiciones de atraque del muelle. La conclusión se basó en el análisis de ambas partes.

1 Antecedentes

1.1 Generalidades del Puerto de Guaymas

El Puerto de Guaymas está situado en el Golfo de California, sobre la costa del estado de Sonora, aprovechando la bahía natural de Guaymas, Figura 1.1 Con coordenadas geográficas 27° 55' N y 110° 54' W, este puerto es un nodo importante de comunicación marítima del Noroeste de la República Mexicana, siendo punto de distribución estratégico tanto para internar productos al país como salida de ellos hacia otras partes de México y del mundo.



Figura 1.1 Puerto de Guaymas.

La infraestructura del puerto permite el manejo especializado de productos agrícolas como hortalizas y granos, siendo el trigo el producto de exportación por excelencia. Además, se manejan algunos productos minerales como concentrado de cobre y mata cobriza (exportación) y *pet coke* y yeso (importación), con movimientos importantes de cemento y ácido sulfúrico, [1].

El Recinto Portuario, administrado desde 1995 por la Administración Portuaria Integral de Guaymas, S. A. de C. V. (API GUAYMAS), tiene una extensión de 149 ha, con un canal de acceso de 4,2 km de longitud, 150 m de amplitud y alrededor de 13 m de profundidad.

El muelle consta de 6 posiciones de atraque, dos de ellas de 13 m de profundidad. La configuración del recinto, dentro de la Bahía de Guaymas, se estableció de acuerdo al esquema de la Figura 1.2.



Figura 1.2 Plano del Recinto Portuario de Guaymas.

Para la conformación del muelle y su extensión actual fue necesario aplicar rellenos para obtener terreno del mar, aprovechando las características físicas de la bahía. En esta saliente extendida artificialmente se ubicó el muelle con la disposición de dos bandas, la Banda Este, con orientación norte-sur, se compone por los tramos 1, 2, 3 y 4; y la Banda Sur, con orientación este-oeste, compuesta por los tramos 5 y 6, indicados en la figura anterior.

La Banda Este tiene una longitud de 875 m, con capacidad de atraque de buques con calados de 3 m en el tramo 1, de 9,5 m en el 2, de 10 m en el 3 y de 11 m en el tramo 4. La Banda Sur se extiende longitudinalmente en 350 m, con capacidad de recibir buques en ambos tramos (5 y 6) con calados de hasta 13 m [1].

De las operaciones sobre el muelle de API GUAYMAS, sobresalen el manejo intensivo de carga y descarga de productos minerales en los tramos 4 y 5, así como el tramo 6, dedicado en buena medida a la carga y descarga de ácido sulfúrico y de granos agrícolas, acondicionado especialmente para esas labores.

1.2 Estructura del muelle

Los seis tramos poseen características constructivas diferentes. De los seis, el tramo 1 consiste en una serie de losas de concreto tendidas sobre tierra firme contenida por muros de concreto, mientras que los restantes son losas por encima del mar. Con casi 300 m de largo, el tramo 1 corresponde al de menor calado, normalmente utilizado para el abastecimiento de combustible a los buques pesqueros de poco calado, Figura 1.3. Este tramo es el más cercano a tierra y el más bajo, con una diferencia de nivel estimada de alrededor de 2 m con respecto al resto de los tramos.

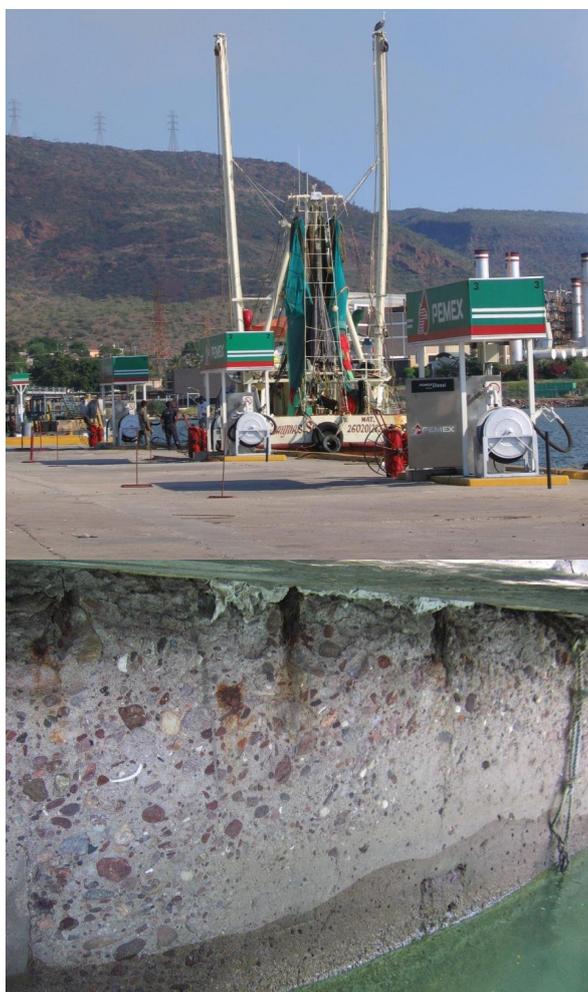


Figura 1.3 Vista del tramo 1 del muelle API GUAYMAS y su muro de contención.

El tramo 2, de 18,5 m de ancho y 200 m de longitud, se compone de losas soportadas por pilas circulares de 1,5 m de diámetro, dispuestas en un arreglo cuadrado de 6,5 m de lado. Como característica propia, en la dirección este-oeste corren traveses de soporte de la losa sobre las pilas, proveyéndole refuerzo transversal. La figura 1.4 muestra una vista inferior de la estructura del tramo 2.



Figura 1.4 Pilas circulares y traves de soporte del tramo 2 del muelle API GUAYMAS.

En los tramos 3, 4, 5 y 6 las losas están soportadas por pilotes cuadrados, originalmente de 0,5 m de sección, en posiciones vertical e inclinada, como se ejemplifica en la Figura 1.5.



Figura 1.5 Ejemplo de pilotes de soporte de la losa en muelles 3 a 6.

El tramo 6 presenta características particulares ya que, además de ser el más alejado y dar con tres de sus lados al mar, soporta la estructura para la carga y descarga de granos y de ácido sulfúrico, como se muestra en la Figura 1.6.



Figura 1.6 Vista desde tierra del tramo 6, con la estructura para carga/descarga de granos y línea de conducción de ácido sulfúrico.

La línea de conducción del ácido sulfúrico descansa sobre ménsulas metálicas apoyadas en la línea extrema de pilotes del tramo, con el tubo principal de carga/descarga atravesando por debajo de la losa, como se muestra en la Figura 1.7.



Figura 1.7 Tubo principal de carga/descarga de ácido sulfúrico bajo el tramo 6.

2 Evaluación de la estructura

2.1 Alcance de la evaluación

La evaluación de los daños por corrosión de la estructura comprendió una serie de ensayos físico-químicos de tipo semi-destructivo y no destructivo, realizados sobre las pilas y pilotes de los Tramos 2 al 6 del muelle del puerto, los cuales se listan a continuación:

- Identificación y caracterización de daños.
- Determinación de las características mecánicas del concreto mediante pruebas de resistencia a la compresión de núcleos y obtención del módulo elástico, índices esclerométricos y ensayos de resistencia a tensión por adherencia.
- Determinación del grado de contaminación interna en el concreto mediante pruebas de carbonatación, contenido de cloruros y contenido de sulfatos.
- Verificación de la concordancia entre la información documental y la estructura construida, así como la medición de espesores de recubrimiento, mediante el uso de equipo de detección del acero de refuerzo.
- Determinación del potencial de corrosión en diferentes áreas.
- Pruebas de carga.

Las pruebas de carga incluyeron el proceso de instrumentación para la medición de deformación unitaria relativa bajo la losa de los tramos mencionados, así como de vibración en algunos puntos sobre la estructura. Las mediciones se realizaron con base en la ejecución de pruebas de carga, utilizando para ello un vehículo de carga pesada tipo camión unitario de tres ejes (C3). Las técnicas utilizadas son del tipo no destructivo, por lo que no se altera la capacidad actual de soporte del muelle.

La deformación unitaria relativa considera únicamente el estado relativo de esfuerzos uniaxiales sobre los puntos instrumentados, no atendiendo estados de deformación existentes ni su historia previa. A partir de la deformación se estima el nivel de esfuerzos producido únicamente por las cargas aplicadas con el vehículo de prueba.

La medición de vibración se realizó con fines comparativos entre puntos distintos sobre la losa del muelle, con la intención de estimar la movilidad de los distintos tramos sujetos a medición.

2.2 Ensayos efectuados y ubicación

En la Figura 1.2 se muestra un croquis de referencia que indica la división por módulos del muelle que se consideró para la elaboración de este informe. Ésta

división y la nomenclatura de identificación de las pilas y pilotes que se indica en las tablas de resultados corresponde a la utilizada en los planos que se elaboraron para la intervención de reparación que se realizó en el año 1996 por la empresa DECSA.

Un resumen cuantitativo de lo realizado se muestra a continuación:

Para las actividades relacionadas con corrosión:

- Identificación de daños visibles y caracterización de los mismos.
- Extracción de 26 núcleos de concreto para la realización de pruebas físicas y químicas.
- Ensaye de resistencia a compresión y determinación de peso volumétrico de 15 especímenes.
- Determinación del módulo elástico en 5 especímenes.
- Determinación del contenido de sulfatos en 2 núcleos.
- 10 pruebas de resistencia a la tensión por adherencia en el concreto con probetas de 75 mm de diámetro.
- 25 sitios en donde se realizó detección de armados y medición de espesores de recubrimiento.
- 100 series para determinación de dureza del concreto mediante esclerómetro.
- 11 determinaciones de profundidad de carbonatación, mediante solución indicadora de pH, realizadas en núcleos de concreto.
- Alrededor de 180 m² de área de lecturas para estimar el potencial de corrosión en el acero de refuerzo.
- 39 extracciones de muestras de polvo de concreto en 13 sitios para determinar el contenido de cloruros solubles en ácido.

Para las actividades relacionadas a las pruebas de carga:

- Selección de puntos de instrumentación.
- Definición de esquemas de instrumentación y medición.
- Colocación de galgas extensométricas.
- Preparación de sistema de adquisición de datos
- Preparación de vehículo para la ejecución de pruebas.
- Ejecución de pruebas de carga.
- Medición de vibración.
- Procesamiento y análisis de datos. Colección de los datos,

La ubicación de los puntos de instrumentación se hizo considerando la disposición geométrica, las características constructivas y la accesibilidad del personal. Para

los ensayos de corrosión, la ubicación se hizo considerando las necesidades de cada ensayo en particular. Para las pruebas de carga, se seleccionaron puntos en pilas, pilotes, traveses y losa para medición de deformación, algunos pares de puntos para medición de desplazamiento relativo entre ambos y algunas vitas para la posterior medición de vibración.

Para el caso del tramo 2, cuya losa se soporta por pilas circulares, se ubicaron 6 puntos de medición que incluyeron dos pilas, dos traveses y dos porciones de la losa, como se muestra en el esquema de la Figura 2.1.

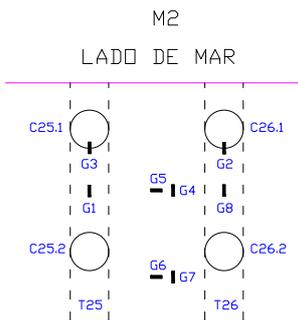


Figura 2.1 Ubicación de puntos de instrumentación en el tramo 2.

En cada punto se colocaron galgas extensométricas, individuales en el caso de pilas y traveses y en pares ortogonales en los puntos en la parte inferior de la losa, aplicando un total de ocho galgas en los seis puntos. En la Tabla 2.1 se muestra su ubicación y orientación.

Tabla 2.1 Identificación de galgas en el tramo 2.

Galga	Ubicación	Orientación
G1	Trabe, entre C25.1 y C25.2	Longitudinal
G2	Pila C26.1	Longitudinal
G3	Pila C25.1	Longitudinal
G5	Losa, entre C25.2, C26.2	Paralela a traveses
G6	Losa, entre C25.2, C26.2	Perpendicular a traveses
G7	Losa, centro de C25.2, C25.3, C26.2 y C26.3	Perpendicular a traveses
G8	Losa, centro de C25.2, C25.3, C26.2 y C26.3	Paralela a traveses
G9	Trabe, entre C26.1 y C26.2	Longitudinal

Para el tramo 3 se aplicaron 9 galgas extensométricas distribuidas en 7 puntos de instrumentación, así como 2 transductores de desplazamiento entre pares de pilotes. Los puntos de instrumentación se observan en la Figura 2.2, mientras que en la Tabla 2.2 se presenta un resumen de la ubicación y orientación de galgas y LVDTs.

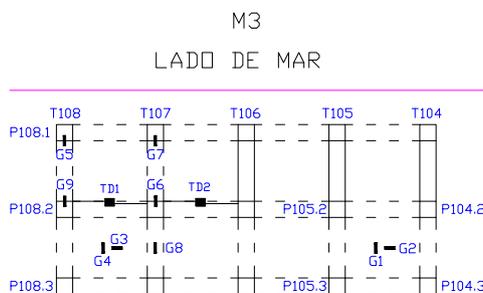


Figura 2.2 Ubicación de puntos de instrumentación en el tramo 3.

Tabla 2.2 Identificación de galgas y sensores de desplazamiento (LVDTs) en el tramo 3.

Galga	Ubicación	Orientación
G1	Losa, centro de P105.2, P105.3, P104.2 y P104.3	Paralela a trabes
G2	Losa, centro de P105.2, P105.3, P104.2 y P104.3	Perpendicular a trabes
G3	Losa, centro de P108.2, P108.3, P107.2 y P107.3	Perpendicular a trabes
G4	Losa, centro de P108.2, P108.3, P107.2 y P107.3	Paralela a trabes
G5	Pilote 108.1	Longitudinal
G6	Pilote 107.2	Longitudinal
G7	Pilote 107.1	Longitudinal
G8	Trabe, entre Pilote 107.2 y Pilote 107.3	Longitudinal
G9	Pilote 108.2	Longitudinal
TD1	Apoyo en Pilote 108.2 y Pilote 107.2	Vertical
TD2	Apoyo en Pilote 107.2 y Pilote 106.2	Vertical

TD1 y TD2: Transductores de desplazamiento

Respecto al tramo 4, los puntos para instrumentación se ubicaron según se indica en la Figura 2.3.

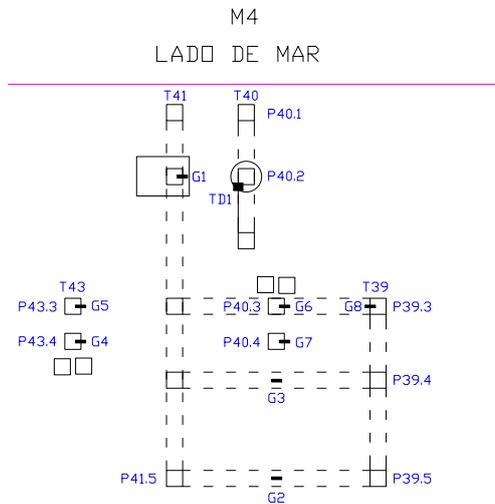


Figura 2.3 Ubicación de puntos de instrumentación en el tramo 4.

En este tramo se utilizaron 8 galgas extensométricas y un LVDT, distribuidos entre travesaños y pilotes, como se muestra en la figura anterior. La disposición de galgas y LVDT se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Identificación de galgas y sensor de desplazamiento (LVDT) en el tramo 4.

Galga	Ubicación	Orientación
G1	Pilote 41.2	Longitudinal
G2	Trabe, entre Pilote 39.5 y Pilote 41.5	Longitudinal
G3	Trabe, entre Pilote 39.4 y Pilote 41.4	Longitudinal
G4	Pilote 43.4	Longitudinal
G5	Pilote 43.3	Longitudinal
G6	Pilote 40.3	Longitudinal
G7	Pilote 40.4	Longitudinal
G8	Pilote 39.3	Longitudinal
TD1	Pilote 40.3 con apoyo en pilote 40.2	Vertical

TD1: Transductor de desplazamiento

En el tramo 5 se ubicaron puntos de instrumentación como se muestra en la Figura 2.4, distribuidos en pilotes, traveses y losa.

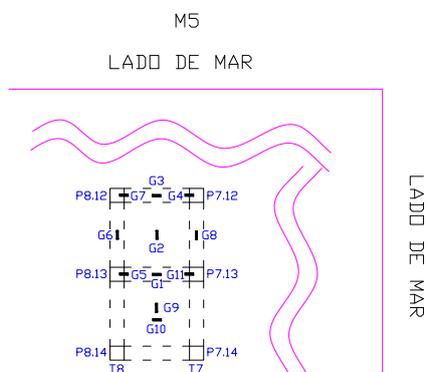


Figura 2.4 Ubicación de puntos de instrumentación en el tramo 5.

En este tramo se utilizaron sólo galgas extensométricas, un total de 11, dispuestas e identificadas como se indica en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Identificación de galgas en tramo 5.

Galga	Ubicación	Orientación
G1	Trabe, entre Pilote 8.13 y Pilote 7.13	Longitudinal
G2	Losa, centro de P8.12, P7.12, P7.13 y P8.13	Paralela a trabe T7
G3	Trabe, entre Pilote 8.12 y Pilote 7.12	Longitudinal
G4	Pilote 7.12	Longitudinal
G5	Pilote 8.13	Longitudinal
G6	Trabe, entre Pilote 8.12 y Pilote 8.13	Longitudinal
G7	Pilote 8.12 inclinado	Longitudinal
G8	Trabe, entre Pilote 7.12 y Pilote 7.13	Longitudinal
G9	Losa, centro de P8.13, P7.13, P7.14 y P8.14	Paralela a trabe T7
G10	Losa, centro de P8.13, P7.13, P7.14 y P8.14	Perpendicular a T7
G11	Pilote 7.13	Longitudinal

Finalmente, en el último tramo, el 6, se establecieron los puntos de instrumentación como se indica en el esquema de la Figura 2.5.

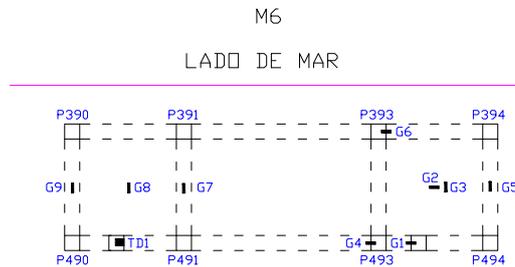


Figura 2.5 Ubicación de puntos de instrumentación en el tramo 6.

Como se presenta en la Figura 2.5, se ubicaron 9 puntos de instrumentación, considerando la colocación de galgas en 8 de ellos y además un transductor de desplazamiento entre los módulos constructivos. En total, se utilizaron 9 galgas extensométricas, dispuestas como se indica en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Identificación de galgas y sensor de desplazamiento (LVDT) en el tramo 6.

Galga	Ubicación	Orientación
G1	Pilote 493A	Longitudinal
G2	Losa, centro de P493, P393, P494 y P394	Perpendicular a trabes
G3	Losa, centro de P493, P393, P494 y P394	Paralela a trabes
G4	Pilote 493	Longitudinal
G5	Trabe, entre P394 y P 494	Longitudinal
G6	Pilote 393	Longitudinal
G7	Trabe, entre P291 y P 491	Longitudinal
G8	Losa, centro de P390, P490, P291 y P491	Paralela a trabes
G9	Trabe, entre P390 y P 490	Longitudinal
TD1	En trabe, con apoyo en Pilote 490	Vertical

TD1: Transductor de desplazamiento

En este caso, el transductor de desplazamiento se colocó entre la línea de unión de dos módulos consecutivos del tramo, de manera que registrara el movimiento relativo entre ellos. Así mismo, la galga G9 se colocó en la trabe del módulo adyacente, similar a uno de los puntos de fijación del TD1.

2.2.1 Plan de Pruebas de carga

Aunque el plan de pruebas inicial involucraba la ejecución en la numeración consecutiva de los tramos en el muelle, éste debió ser ajustado y modificado de acuerdo a las condiciones de trabajo en el muelle por la presencia de buques. De esta manera, las pruebas fueron ejecutadas en espacios de tiempo con menor interferencia con la operación normal del muelle, realizadas en diversas horas del día y en distintos días, particularmente en los tramos 4, 5 y 6.

Las pruebas consistieron en desplazar el vehículo cargado a lo largo de los tramos, sobre distintas trayectorias rectilíneas paralelas sobre la zona instrumentada en cada tramo, como se muestra en los esquemas de las Figuras 2.6a a 2.6e.

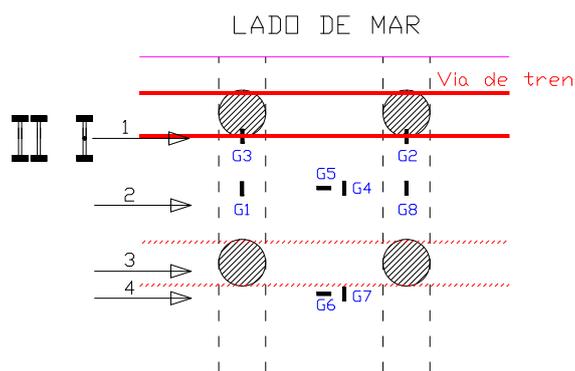


Figura 2.6a. Esquema de trayectorias de prueba en el tramo 2

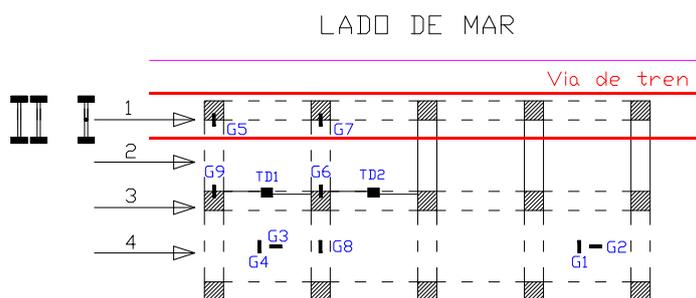


Figura 2.6b. Esquema de trayectorias de prueba en el tramo 3. No se muestra la bifurcación de una segunda vía de ferrocarril, guía parcial de la trayectoria en el tramo 3

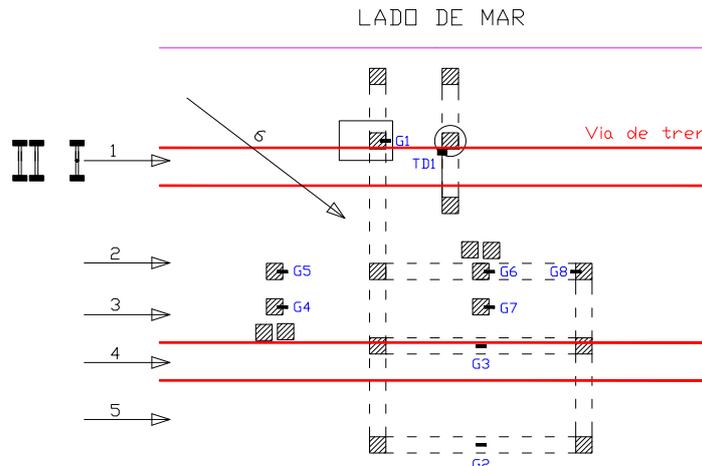


Figura 2.6c. Esquema de trayectorias de prueba en el tramo 4. La trayectoria 6 representa una trayectoria en diagonal con maniobra de frenado

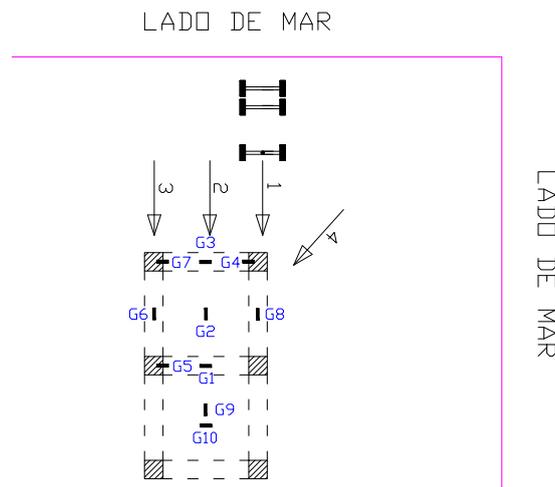


Figura 2.6d. Esquema de trayectorias de prueba en el tramo 5. La trayectoria 4 representa una trayectoria en diagonal con maniobra de frenado

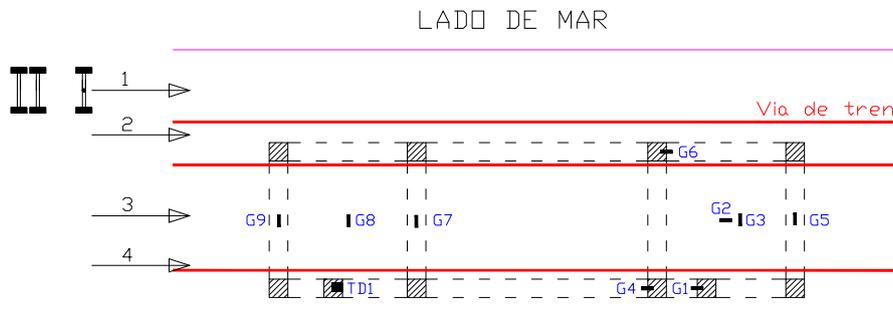


Figura 2.6e. Esquema de trayectorias de prueba en el tramo 6

Con el propósito de obtener la respuesta a carga cuasiestática de la estructura, el vehículo se hizo desplazar a muy baja velocidad, estimada en menos de 2 km/h. Así mismo, como parte complementaria, el vehículo se desplazó sobre las mismas trayectorias a una velocidad de alrededor de 12 km/h, simulando la velocidad estimada de operación sobre el muelle. El orden de ejecución fue 6, 2, 3, 5 y 4. En las Figuras 2.7a a 2.7e se presenta parte del desarrollo de las pruebas en los distintos tramos.



Figura 2.7a Aspectos diversos de la ejecución de pruebas en el tramo 2



Figura 2.7b Aspectos diversos de la ejecución de pruebas en el tramo 3

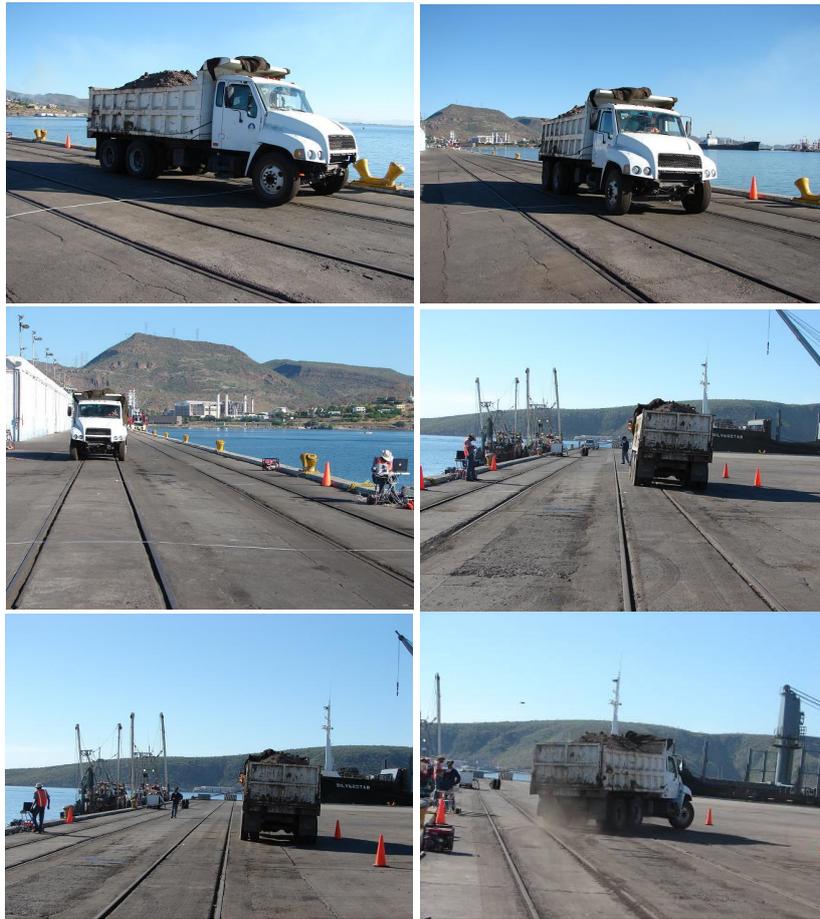


Figura 2.7c Aspectos diversos de la ejecución de pruebas en el tramo 4

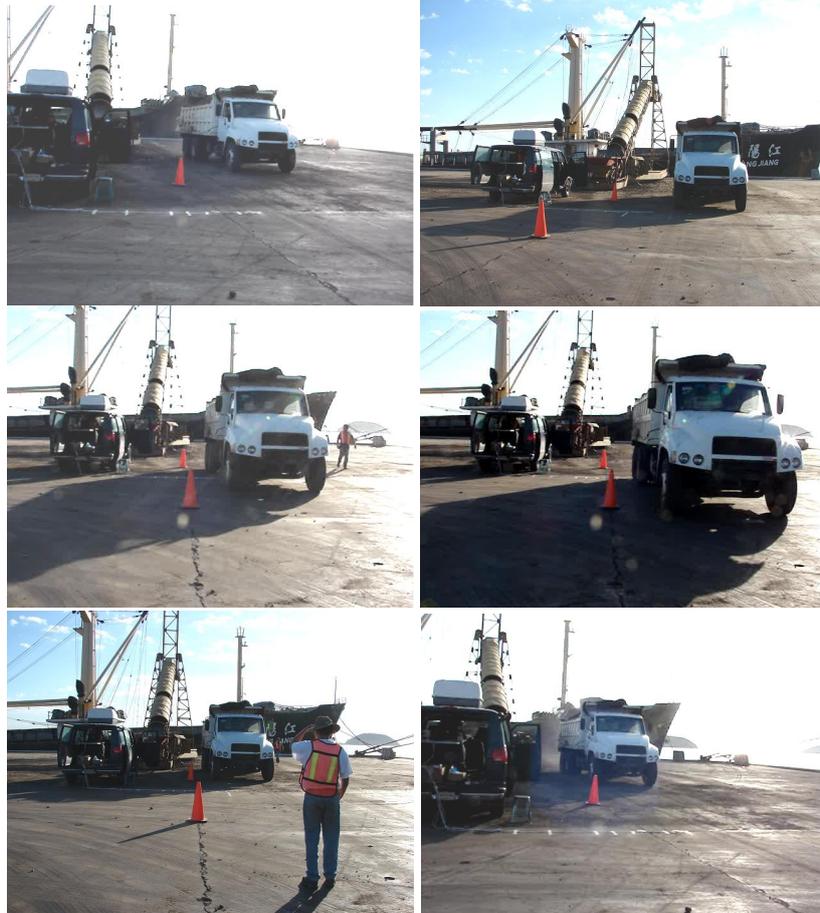


Figura 2.7d Aspectos diversos de la ejecución de pruebas en el tramo 5

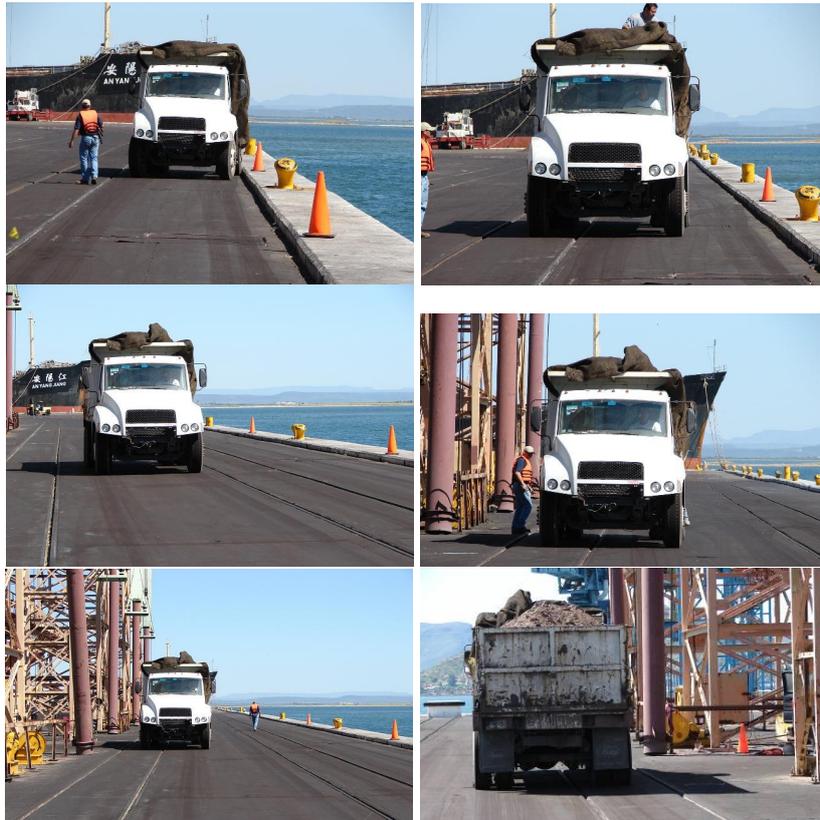


Figura 2.7e Aspectos diversos de la ejecución de pruebas en el tramo 6

Por cada trayectoria de paso seleccionada y velocidad de desplazamiento se realizaron tres repeticiones. En algunos tramos, atendiendo las características de maniobrabilidad del tramo, se realizaron además mediciones con frenado del vehículo y con cambio de dirección, simulando el seguimiento de una curva.

En la Figura 2.8 se presenta del despliegue de un registro típico de medición.

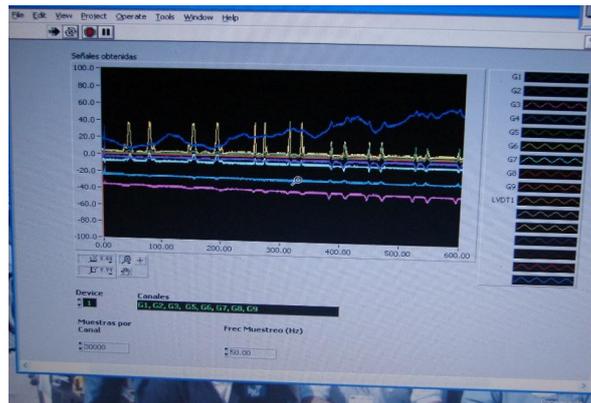


Figura 2.8 Ejemplo gráfico de la adquisición y registro de datos

Estos datos fueron posteriormente procesados para obtener los valores máximos y mínimos observados y su correspondencia con el paso del vehículo.

2.2.2 Medición de Vibraciones

Posterior a las pruebas de carga se realizaron mediciones de vibración. Con el propósito de promover la vibración durante los periodos de medición, el vehículo se desplazó a baja velocidad a lo largo del muelle, en trayectoria cercana al punto de medición. Por cada dirección de medición se realizaron dos pruebas tomando de referencia el cuerpo de algunas vitas. Estas direcciones fueron una en la dirección vertical y otra en dirección horizontal, transversal al eje longitudinal del tramo, como se observa en la Figura 2.9.



Figura 2.9 Ubicación de acelerómetro sobre la vita durante medición de vibraciones

Debido a la presencia de un buque en operación intensa de carga durante el periodo de medición de vibraciones, no se realizaron mediciones en el tramo 6.

3 Resultados de la evaluación

3.1 Resistencia a compresión y módulo de elasticidad

La extracción de núcleos de concreto se realizó de acuerdo a la norma ASTM C42/C 42M-99, mientras que el ensaye se llevó a cabo de acuerdo a las normas NMX-C-83, NMX-C-109 y NMX-C-169. Vale la pena apuntar que dado que el diámetro de los núcleos de concreto extraídos fueron pequeños (5 y 7 cm), comparados con el tamaño de agregado encontrado (hasta 2 pulgadas en muchos de los casos), la resistencia obtenida de los ensayes a compresión simple está subestimada con respecto a los cilindros de 15 x 30 cm que normalmente se ocupan con concreto fresco para determinar el f_{ϕ} . En este sentido, se puede esperar que la resistencia del concreto ensayado sea del orden de un 10 a 15% menor comparado contra los cilindros mencionados. En este reporte, los resultados que se exponen son los se obtuvieron directamente de los ensayes.



Considerando lo anterior, en general se puede distinguir que el concreto, tanto de el cuerpo original de los pilotes como de las reparaciones, presenta resistencia suficiente para estar por encima del f_{ϕ} de proyecto (250 kg/cm^2).

En Figura 3.1 se muestra un resumen de los resultados de resistencia a la compresión. Los valores mínimos y máximos que se indican corresponden a la resta o suma de la desviación estándar obtenida, del valor promedio de la resistencia. Cabe destacar que la desviación estándar promedio fue de 90 kg/cm^2 , la de los pilotes sin reparar de 73 kg/cm^2 y la de los pilotes reparados de 115 kg/cm^2 . El coeficiente de variación (C.V.) promedio fue de 26%, para los pilotes sin reparar fue de 21% y los pilotes reparados de 31%.

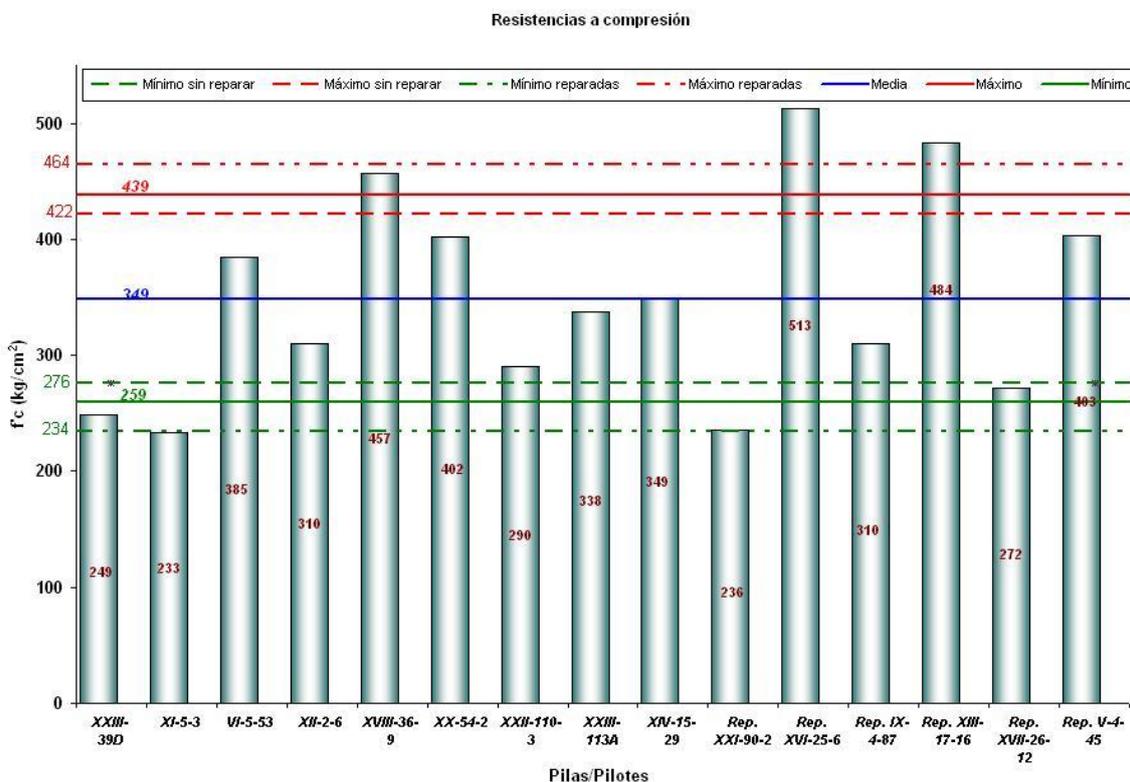


Figura 3.1 Resistencia a la compresión de pilotes sin reparar y reparados

El coeficiente de variación ofrece una forma de estimar la homogeneidad del concreto. Aunque hay que tomar en cuenta lo comentado acerca del tamaño del agregado con respecto al diámetro de los núcleos, el valor del C.V. promedio de 26% obtenido, no deja de ser indicativo de importantes variaciones en la elaboración del concreto (dosificación de materiales, relación a/c, mezcla, colocación, compactación, etc.).

Por otro lado, los pesos volumétricos obtenidos denotan un concreto de regular calidad en términos de durabilidad (promedio: $\gamma = 2123 \text{ g/cm}^3$). Normalmente, para disminuir la permeabilidad, un concreto diseñado para ser expuesto a condiciones ambientales de esta naturaleza, tiene un peso volumétrico más alto. Además, otro indicativo de la heterogeneidad en el concreto son los valores registrados para el módulo elástico. Este ensaye se realizó bajo la norma NMX C-128 mediante la instrumentación de los núcleos con deformímetros (strain-gages). Los resultados de los módulos elásticos se muestran en la Figura 3.2.

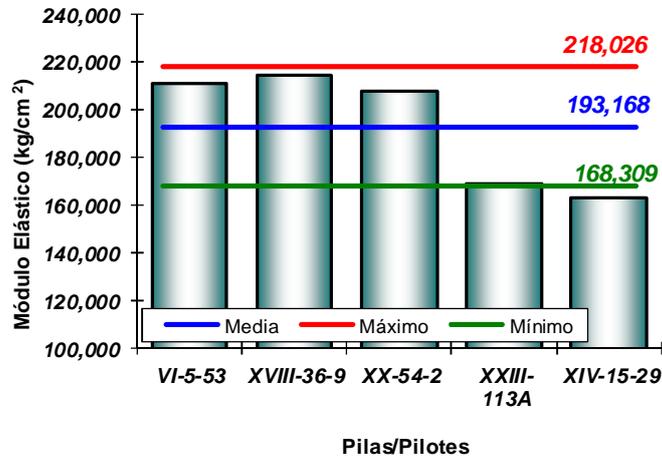


Figura 3.2 Módulos elásticos

El promedio obtenido de los módulos elásticos es comparable a un concreto de calidad tipo 2 de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias (NTC) del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) y es un 28% menor al sugerido para utilizar en el reglamento del American Concrete Institute, ACI 318. Este valor promedio fue el usado en el análisis estructural que evaluó las deformaciones ante cargas dinámicas.

3.2 Ensayes esclerométricos

Estos ensayos fueron realizados de acuerdo a la norma ASTM C805-97 mediante un esclerómetro marca Germann Instruments, modelo D-100, con una escala con rango de lectura de número de rebote de 10 a 100. La Tabla 3.1 presenta un compendio de los resultados.

Tabla 3.1 Resumen de índices esclerométricos

	Posición del esclerómetro	No. de rebote promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	No. de rebote mínimo y máximo	Resistencia promedio estimada (kg/cm ²)	Resistencia mínima y máxima estimada (kg/cm ²)
Pilas / Pilotes originales	Horizontal	47,8	5,8	12,1%	42,0	457	380
					53,6		541
Reparaciones	Horizontal	43,4	6,3	14,4%	37,1	393	302
					49,7		492

La esclerometría sirve para tener una idea de la homogeneidad del concreto. Para este caso, si bien debe notarse en algunas gráficas existen sitios donde los resultados se alejan del promedio, los coeficientes de variación son mucho menores que el obtenido mediante las pruebas de resistencia a compresión. Esto se debe a que el golpe del esclerómetro mide al concreto integral y no a un pequeño núcleo que es muy sensible a la distribución y tamaño del agregado cuando su diámetro no tiene dimensiones adecuadas.

En la penúltima columna de la derecha de la Tabla 2 se obtuvo la resistencia promedio del concreto haciendo uso de las gráficas de correlación de número de rebote vs. f_{cp} . Estas correlaciones de resistencia de ninguna manera deben interpretarse directamente dado la baja confiabilidad de los ensayos esclerométricos, aunque son de utilidad para darnos un cierto punto de referencia. Así, es de notar que aunque se manejan valores un 10 a 15% mayores para los resultados de los ensayos de compresión simple por las razones ya mencionadas, hay buena correspondencia con éstos índices esclerométricos.

Finalmente, con el mismo sentido de referencia aproximada, en la última columna de la tabla se han calculado los máximos y mínimos de las resistencias a compresión inferidas a partir de la desviación estándar obtenida de los valores de número de rebote.

3.3 Pruebas de adherencia



Fueron realizadas de acuerdo con la norma ASTM C-881-90, con equipo marca Germann Instruments, modelo Bond Test, con rango de lectura de 0 a 25 kN, y mediante probetas de acero de 7,6 cm de diámetro.

La preparación de la superficie se realizó con escarificado ligero manual. En la Tabla 3.2 se muestra el resumen de los resultados.

Tabla 3.2 Resumen de pruebas de adherencia

Ubicación	Promedio (kg/cm ²)	Desviación estándar	Coef. de variación	Máximo (kg/cm ²)	Mínimo (kg/cm ²)
Pila/Pilote Repados	15,6	2,4	15,4%	18,1	13,2
Pila / pilote original	17,5	3,7	21,2%	21,2	13,8
Total	16,8	3,2	19,4%	20,0	13,5

3.4 Detección de armados.

Las lecturas se realizaron con un equipo marca Protovale, modelo CoverMaster CM90, con rangos de lectura desde 7 hasta 180 mm y para barras de 5 a 50 mm de diámetro.

Los valores obtenidos se confrontaron contra la información contenida en los planos que fueron proporcionados por la Gerencia de Ingeniería de la API. Aunque hay factores que interfieren para la obtención de lecturas confiables (alto contenido de humedad, traslapes de varillas en el elemento, cercanía de instalaciones metálicas o elementos metálicos embebidos o anclados en el concreto, corrosión en el acero, grandes variaciones en los espesores de recubrimiento, etc.), en general se obtuvieron resultados que tienen coherencia con la información documental.

De los resultados obtenidos, es notable la gran variación registrada en los espesores de recubrimiento del acero de refuerzo examinado, comprendiendo desde 2,2 hasta 9,6 cm en el cuerpo original de las pilas o pilotes y desde 8,5



hasta 14 cm en las zonas reparadas. Así mismo, se presenta también gran variación en la distribución de los estribos en los pilotes.

3.5 Profundidad de carbonatación.

La impregnación de los núcleos de concreto con una solución indicadora de pH se efectuó para determinar la profundidad de avance del frente de carbonatación. En la Tabla 3.3 se muestran los datos obtenidos de esta prueba.

Tabla 3.3 Profundidades de carbonatación

Pila / Pilote	Prof. de carbonatación (mm)
XXIII-14A	20
XIX-42-7	20
X-8-97	40
XVIII-4-76	35
XIV-17-24	35
VII-6-63	50
IV-3-33	30
Rep. XV-14-33	20
Rep. I-5-3	5
Rep. III-2-23	10
Rep. XXI-96-2B	15

Al igual que en los ensayos anteriores, hay una gran variación en los resultados. En el concreto original de los pilotes, el efecto químico de la penetración de los gases CO₂ va desde los 20 a los 50 mm, mientras que en el material de las reparaciones, de menor edad, el frente de carbonatación sólo penetró 20 mm en el peor de los casos.

Comparando los resultados de la tabla 6 con los espesores de recubrimiento, es posible identificar que el frente de carbonatación alcanzó en buena parte de los casos al acero de refuerzo (5 de las 7 muestras en el concreto original alcanzan al

25% del acero examinado, ver (Figura 3.3) y sin duda contribuyó al desarrollo de los problemas por corrosión que se presentaron a lo largo de la vida del muelle.

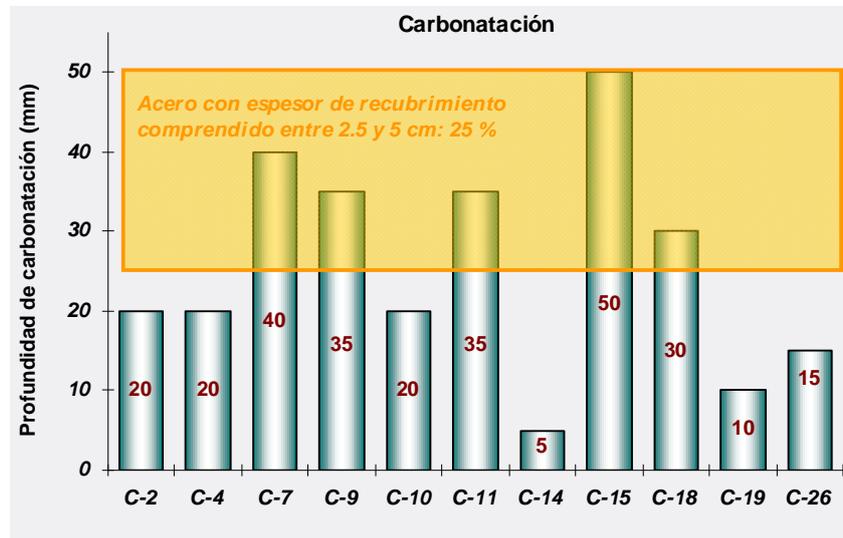


Figura 3.3 Comparación de las profundidades de carbonatación con posición de acero.

La Figura 3.4 muestra las fotografías de cada uno de los núcleos en los que se realizó el ensaye indicador de pH para obtener los datos que expuestos en la tabla 3.2.



Total de núcleos extraídos para ensayos de resistencia a compresión, carbonatación y contenido de sulfatos

Determinación del estado de corrosión y capacidad de carga de los muelles del puerto de Guaymas



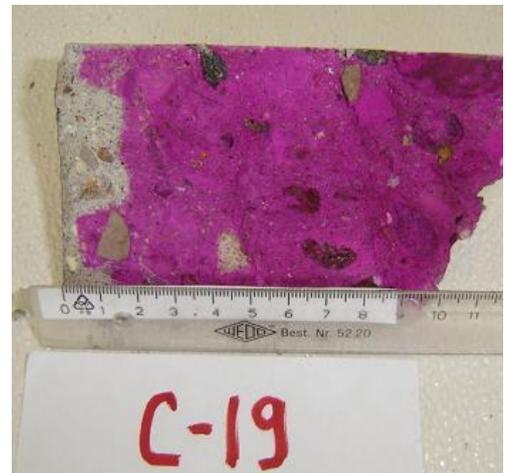


Figura 3.4 Frentes de Carbonatación de los cilindros extraídos

3.6 Contenido de cloruros.

Para la determinación del contenido de cloruros solubles en ácido, se ensayaron muestras de 1,5 gramos de polvo de concreto extraídas en 3 rangos de profundidades para cada uno de los sitios. Las profundidades elegidas fueron de 0 a 25, de 25 a 50 y de 50 a 75 mm, excepto en las muestras extraídas en las zonas reparadas, en las cuales, al tener una sección mayor que las del pilote original y por lo tanto mayores espesores de recubrimiento, se eligieron las profundidades de 50 a 75, 75 a 100 y 100 a 125 mm.

Las mediciones fueron efectuadas con equipo marca Germann Instruments, modelo RCT, (Figura 3.5) obteniéndose los valores que se exponen en el Anexo 6.



Figura 3.5 Extracción de muestras para cloruros y equipo empleado

3.6.1 Los resultados de cloruros en Pilas y Pilotes se muestran a continuación.

3.6.1.1 En el cuerpo original (3 sitios).

Las muestras fueron extraídas a una altura de entre 5 a 10 cm por encima del nivel aproximado de marea máxima, que es la zona de exposición permanente de oxígeno con mayor concentración de cloruros. Los contenidos de cloruros son muy altos inclusive a la profundidad de 5 a 7.5 cm, en donde el contenido mínimo encontrado es de 0,26 % con respecto al peso del cemento. Como referencia estadística, la tabla 3.4 se elaboró confrontando los valores promedio de contenido de cloruros en cada una de las profundidades evaluadas, contra los resultados de espesores de recubrimientos obtenidos con el detector de armados:

Tabla 3.4 Comparativo de lecturas de recubrimiento contra contenido de Cl⁻ en pilotes originales

Ubicación	Profundidad de 0 a 2,5 cm		Profundidad de 2,5 a 5 cm		Profundidad de 5 a 7,5 cm		Profundidad > 7,5 cm		Total Lecturas
	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	
Pilas / pilotes originales	2	3,1%	15	23,4%	29	45,3%	18	21,1%	64
Cl ⁻ promedio (%/ W _{cem})	5,00%		2,05%		1,18%		n/d		

Por citar un ejemplo de esta tabla, se observa que el 45,3 % del acero inspeccionado se encuentra a una profundidad de entre 5 a 7,5 cm. Lo cual significa que a esa profundidad, el contenido de cloruros es de 1,18% de contenido de iones cloruro con respecto al peso del cemento y los criterios de evaluación internacionales establecen el 0,4% de cloruros respecto al peso de cemento como valor umbral para el inicio de la corrosión.

3.6.1.2 En reparaciones (4 sitios).

Se eligieron los sitios a la misma altura que en el caso anterior, aunque, como ya se mencionó, esta vez las muestras se extrajeron a mayor profundidad con la finalidad de conocer el contenido de cloruros lo más cerca posible del acero de refuerzo. Salvo en uno de los cuatro sitios examinados, los niveles de cloruros son considerables aun a profundidades mayores a 10 cm. Se muestra también la tabla 3.5 comparativa:

Tabla 3.5 Comparativo de lecturas de recubrimiento contra contenido de Cl⁻ en pilas reparadas

Ubicación	Profundidad de 5 a 7,5 cm		Profundidad de 7,5 a 10 cm		Profundidad de 10 a 12,5 cm		Profundidad > 12,5 cm		Total Lecturas
	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	
Reparaciones	0	0,0%	8	20,0%	17	42,5%	15	37,5%	40
Cl ⁻ promedio (%/ W _{cem})	0,60%		0,39%		0,26%		n/d		

3.6.1.3 En zona de variación de mareas (2 sitios).

Estas muestras fueron extraídas para medir el contenido de cloruros dentro de la altura del pilote en la cual ocurre la variación diaria de marea y comparar resultados contra los valores de los dos casos anteriores. Los contenidos de cloruros son muy altos a todas las profundidades tanto en el pilote original como en la reparación, sin embargo, son pocos los daños que se presentan en esta zona debido a que el agua que satura los poros en el concreto y que no tiene el tiempo suficiente para evaporarse antes de que la marea vuelva a subir, impide el ingreso de oxígeno libre (Tabla 3.6).

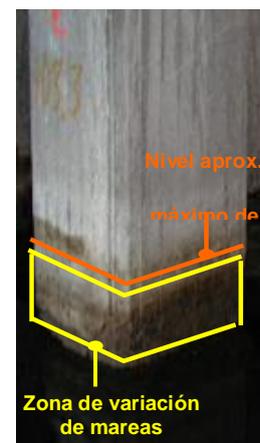


Tabla 3.6 Comparativo de lecturas de recubrimiento contra contenido de Cl en zona de mareas

Ubicación	Profundidad de 0 a 2,5 cm		Profundidad de 2,5 a 5 cm		Profundidad de 5 a 7,5 cm		Profundidad > 7,5 cm	
	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%
III-8-24	1	33,0%	1	33,0%	1	33,0%	0	0,0%
Cl promedio (%/ W_{cem})	3,18%		1,14%		0,51%		n/d	
Reparaciones XI-8-106	1	33,0%	1	33,0%	1	33,0%	0	0,0%
Cl promedio (%/ W_{cem})	5,40%		5,40%		4,98%		n/d	

3.6.1.4 En bloque de reparación para dos pilotes (1 sitio).

En algunos casos, las reparaciones se efectuaron colando un gran bloque de concreto que incluyera dos (e inclusive 3) pilotes al mismo tiempo. En la mayoría de las veces, estos bloques fueron armados con acero y prácticamente todos tienen un severo deterioro por corrosión, debido a la alta permeabilidad del concreto y un bajo recubrimiento (Tabla 3.7).

Tabla 3.7 Comparativo de lecturas de recubrimiento contra contenido de Cl⁻ en pilotes reparados como bloque

Ubicación	Profundidad de 5 a 7,5 cm		Profundidad de 7,5 a 10 cm		Profundidad de 10 a 12,5 cm		Profundidad > 12,5 cm		Total Lecturas
	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	
XII-19-2A	1	33,0%	1	33,0%	1	33,0%	0	0,0%	3
Cl ⁻ promedio (%/ W _{cem})	5,40%		5,40%		4,98%		n/d		

3.6.1.5 Losa (2 sitios).

Se extrajeron muestras en dos sitios en el lecho inferior de la losa original del muelle (hay tramos del muelle en donde en las reparaciones de 1996 se sustituyó la losa completamente) para evaluar su grado de contaminación. Los resultados muestran que los niveles de cloruros son aún muy bajos después de los 2,5 cm de profundidad (Tabla 3.8).

Tabla 3.8 Comparativo de lecturas de recubrimiento contra contenido de Cl⁻ en losa

Ubicación	Profundidad de 0 a 2,5 cm		Profundidad de 2,5 a 5 cm		Profundidad de 5 a 7,5 cm		Profundidad > 7,5 cm		Total Lecturas
	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	
I (entre 7-3 y 7-2)	1	33,0%	1	33,0%	1	33,0%	0	0,0%	3
Cl ⁻ promedio (%/ W _{cem})	0,09%		0,03%		0,02%		n/d		
V (entre 3-47 y 4-47)	1	33,0%	1	33,0%	1	33,0%	0	0,0%	3
Cl ⁻ promedio (%/ W _{cem})	0,06%		0,05%		0,04%		n/d		

3.6.1.6 En rampa de acceso al muelle en el Tramo 5 (1 sitio).

Durante los trabajos de reparación de finales de los 90s, se quedó la incertidumbre de saber si algunas losas del muelle fueron coladas utilizando aditivo acelerante base cloruros. Se identificó una zona donde se tenía mayor sospecha y se extrajeron muestras para obtener los contenidos de cloruros. Los resultados indican que las concentraciones de cloruros son bajas y no representan riesgo potencial de corrosión (Tabla 3.9).

Tabla 3.9 Comparativo de lecturas de recubrimiento contra contenido de Cl⁻ en rampa del tramo 5

Ubicación	Profundidad de 5 a 7,5 cm		Profundidad de 7,5 a 10 cm		Profundidad de 10 a 12,5 cm		Profundidad > 12,5 cm		Total Lecturas
	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	No. de lecturas	%	
Rampa de acceso Tramo 5	1	33,0%	1	33,0%	1	33,0%	0	0,0%	3
Cl ⁻ promedio (%/ W _{cem})	0,08%		0,02%		0,02%		n/d		

3.7 Contenido de sulfatos.

El ACI 201.2R clasifica el grado potencial de ataque por sulfatos (SO₄) en el concreto de acuerdo al porcentaje contenido en él con respecto al peso del cemento, como lo muestra la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Criterio de evaluación del grado de ataque por sulfatos

Nivel de ataque	% de SO ₄ / W _{cem}
Insignificante	0 . 0,1
Moderado	0,1 . 0,2
Severo	0,2 . 2,0
Muy severo	más de 2,0

Por otro lado, el ensaye para determinar el contenido de sulfatos en los núcleos de concreto extraídos en sitio, efectuado conforme a las normas ASTM C-114 y C1218, arrojó los valores que se muestran en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Contenido de sulfatos

Pilote	% de SO ₄ / W _{cem}
Rep. XIII-17-16	0,02
XIV-15-29	0,04

Comparando los resultados de la tabla 3.11 con la clasificación del ACI, resulta que el concreto en estudio tiene un contenido insignificante de sulfatos, el cual no representa ningún tipo de riesgo para su integridad.

3.8 Potencial de corrosión.

La técnica empleada con el equipo Cormap System CM-4000, marca James Instruments y constituido de una media celda cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4), consiste en obtener lecturas de diferencias de potencial, medidas en milivolts, para estimar la probabilidad de la existencia de corrosión en el acero de refuerzo de acuerdo al criterio que establece la norma ASTM C 876-91:

- Las lecturas mayores a .200 mV indican un probabilidad del 90% o mayor de que no exista corrosión.
- Las lecturas comprendidas entre .200 y .350 mV indican incertidumbre (50% de probabilidad) en la actividad corrosiva.
- Las lecturas menores a .350 mV indican una probabilidad del 90% o mayor de existencia de corrosión activa.

En los diferentes módulos, se eligió evaluar una hilera de pilas/pilotes, tomando lecturas a diferentes alturas en cada una de las caras de los mismos. En muchos pilotes, debido a dificultades en el acceso, no fue posible tomar lecturas en todas sus caras.

El total del área en las diferentes zonas evaluadas fue de 180 m². En la tabla 3.12, la columna de la izquierda, %altura+, indica la distancia, medida partir del nivel aproximado máximo de marea, a la que fueron tomadas las lecturas. Para las zonas reparadas en los pilotes, se realizaron demoliciones en el concreto para tomar lecturas más cercanas al acero de refuerzo, suponiendo que los altos espesores de recubrimiento pudieran arrojar lecturas no confiables. Sin embargo, las lecturas tomadas dentro de las calas, al compararlas con lecturas tomadas superficialmente en la reparación, fueron prácticamente iguales. A partir de esto, todas las lecturas reportadas fueron tomadas superficialmente, tanto en el concreto del cuerpo original de los pilotes, como en el concreto de reparación.



Tabla 3.12 Potenciales de media celda

		Pilote XI-8-103				Pilote XI-3-103			
Altura (m)		N	S	E	W	N	S	E	W
	2.0		-70	-65	-60	-88	-35	-56	-32
1.6		-100	-90	-146	-195	-43	-45	-39	-65
1.2		-165	-124	-169	-205	-156	-138	-124	-134
0.8		-272	-350	-275	-360	-176	-213	-180	-178
0.4		-442	-426	-420	-405	-280	-346	-265	-231

		Pilote XI-7-103				Pilote XI-1-103			
Altura (m)		N	S	E	W	N	S	E	W
	2.0		-21	-25	-19	-15	-32		-28
1.6		-20	-18	-30	-25	-45		-36	
1.2		-85	-91	-69	-77	-127		-113	
0.8		-89	-99	-111	-106	-205		-189	
0.4		-178	-268	-169	-165	-290		-273	

		Pilote XI-5-103			
Altura (m)		N	S	E	W
	2.0		-27	-35	-32
1.6		-25	-40	-36	-25
1.2		-81	-66	-65	-75
0.8		-195	-208	-204	-267
0.4		-305	-290	-281	-399

		Pilote XI-4-103			
Altura (m)		N	S	E	W
	2.0		-43	-38	-54
1.6		-80	-88	-65	-76
1.2		-145	-136	-158	-143
0.8		-304	-235	-296	-273
0.4		-356	-288	-306	-375

Notas:
 Alturas aproximadas, referidas al nivel máximo de marea.
 N,S,E,W = Punto cardinal al que apunta la cara del elemento
 AR = Altura aproximada de la reparación existente.

En coherencia con los resultados de las pruebas de contenido de cloruros, los potenciales obtenidos son en general altos en prácticamente todos los módulos, incluyendo las pilas del módulo XXIII que son de más reciente construcción. Las lecturas más altas son las localizadas en la sección de los pilotes comprendida en una longitud de aproximadamente 50 cm justo encima del nivel máximo de marea. Es notable que en las secciones del muelle de más reciente construcción, también se registraron lecturas que manifiestan un elevado nivel de potencial de corrosión.

Por otro lado, en algunas series se tomaron lecturas en las trabes. Salvo en algunos puntos localizados, los registros obtenidos en éstos elementos fueron bajos.

3.9 Identificación de daños.

La gran mayoría de los pilotes de los módulos I a XXII han sido intervenidos en diferentes etapas para mitigar los daños por corrosión. Muchas de éstas reparaciones se conservan en buen estado, pero una buena cantidad presenta deterioro. Desconocemos la cronología de las reparaciones pero al parecer el procedimiento fue el mismo: retiro del concreto deteriorado, limpieza y posible reparación del acero existente y recuperación con un colado de concreto de mayor sección que la original. Algunas de éstas reparaciones tienen sección rectangular, otras, la mayor parte, tienen sección circular. Algunas pocas tienen ambas y otras inclusive son grandes bloques que se colaron abarcando dos o más pilotes simultáneamente. De los núcleos extraídos se puede deducir que el material del colado de reparación varía significativamente. Algunas reparaciones se hicieron con concreto convencional y otras con mortero sin contracción o grout con adición de agregado grueso. De las realizadas con concreto, algunas fueron armadas con acero de refuerzo adicional, y son precisamente las que presentan mayor deterioro (figuras 3.6 y 3.7), especialmente los grandes bloques que se colaron para reparar varios pilotes simultáneamente (figuras 3.8 y 3.9). De las reparaciones realizadas con grout (sección circular) son pocas las que presentan daños.



Figura 3.6

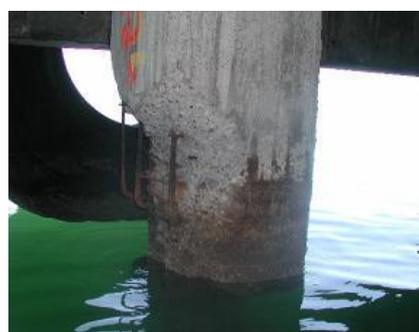


Figura 3.7



Figura 3.8



Figura 3.9

Los primeros ejes de pilotes de la cara sur en la Banda Sur (módulos V, VI, VII) tienen capiteles en la conexión con la estructura, colados con un concreto diferente (más pobre) que el del cuerpo de los pilotes. La gran mayoría de éstos presentan desintegración del concreto y alta corrosión en el acero de refuerzo (Figuras 3.10 y 3.11).



Figura 3.10



Figura 3.11

Por otro lado, existen numerosos pilotes que en su momento no presentaban daños y que por lo tanto no fueron involucrados en las reparaciones, pero que actualmente presentan ya evidencias de agrietamientos, delaminación, desprendimientos y hasta pérdida de sección en el acero (Figura 3.12). Particularmente, en el eje de la cara norte de la banda Sur (módulos VI a XI), los pilotes conservan su sección original pero presentan severos daños por corrosión, especialmente en la zona en la que se encuentran anclados perfiles de acero que sirven como ménsulas de soporte de las tuberías de ácido sulfúrico. Es evidente

que se corre riesgo de que las tuberías se desplomen si no se efectúan a tiempo las reparaciones pertinentes. Lo mismo sucede en la longitud no intervenida de pilotes que si han sido reparados (Figura 3.13). En algunos de estos casos, la corrosión apareció muy localmente justo encima o debajo de la reparación, habiendo destrucción no solo del recubrimiento sino del núcleo de concreto y dejando en alto riesgo estructural a los pilotes puesto que todo el peso descansa únicamente en el acero corroído (Figuras 3.14 y 3.15).



Figura 3.12



Figura 3.13

En lo que respecta al módulo XXIII del muelle, que es de más reciente construcción, se observa que buena parte de las pilas presentan daños por corrosión, desde puntos localizados hasta áreas extensas delaminadas y con pérdida significativa de sección en el acero de refuerzo longitudinal y pérdida total en el acero transversal (Figura 3.13).



Figura 3.14



Figura 3.15



Figura 3.16



Figura 3.17

Además de los daños en pilotes, también existen, aunque solo en ciertos puntos, daños por corrosión en losas y trabes en algunos módulos (se presentan más en módulos XX, XXI y XXII, Figuras 3.18 y 3.19). Durante los trabajos de reparación más recientes, en algunos módulos se demolieron completamente las losas y se volvieron a colar. Éstas partes no presentan ningún daño al momento.



Figura 3.18



Figura 3.19

Es evidente que también se han hecho reparaciones recientes de desprendimientos por corrosión en estos elementos, sin embargo, la calidad de las mismas es pobre y es de esperar que no tengan durabilidad adecuada (Figuras 3.20 y 3.21). Inclusive existen zonas en donde no se retiró la cimbra utilizada.



Figura 3.20



Figura 3.21

En las zonas donde se localizan las juntas constructivas entre dos tramos consecutivos del muelle, el agua que se filtró a través y se acumuló, provocó que las trabes que se encuentran delimitando la junta y las losas colindantes presenten problemas de corrosión (Figuras 3.22 y 3.23) que se aprecian severos en algunos casos.



Figura 3.22



Figura 3.23

Al igual que las losas de algunos módulos, la pantalla del muelle (al parecer en las dos bandas) se demolió y se reconstruyó completamente. Sin embargo, en ciertos puntos la falta de vibrado durante el colado dejó panaleras que han propiciado daños prematuros por corrosión, aunque aún son pocos e incipientes y se presentan únicamente en la cara inferior (Figura 3.24).



Figura 3.24

Existen daños considerables por corrosión en algunos puntos de los muros interiores del muelle, aunque no están generalizados (Figura 3.25).



Figura 3.25 Daños en el interior del muelle

3.10 Relación esfuerzo-deformación

Las mediciones realizadas sobre la estructura del muelle, en sus distintos tramos, proporcionaron principalmente información de deformación unitaria relativa. Además, se obtuvo información del comportamiento vibratorio en algunos puntos asociado con los tramos del muelle excepto en los tramos de la Banda Sur, debido a que se realizaban operaciones de carga a un buque.

La medición de la deformación unitaria es el parámetro base para la determinación de esfuerzos en estructuras. De acuerdo a la teoría de elasticidad bajo criterios de linealidad en los materiales, esfuerzo y deformación se relacionan de acuerdo a la Ley de Hooke. Considerando que el comportamiento bajo carga del concreto

durante las pruebas se lleva elásticamente, denotando σ como el esfuerzo, E como módulo de elasticidad y ε como la deformación unitaria, los esfuerzos producidos por la carga aplicada se pueden estimar tomando como base la expresión siguiente:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Como se observa en la expresión anterior, la estimación requiere del conocimiento del módulo de elasticidad, propiedad mecánica del material que define el comportamiento esfuerzo-deformación en el intervalo elástico.

El concreto hidráulico es un material que muestra comportamientos muy variados, pues como resultado de la combinación y aglutinamiento de distintos componentes, depende de características del cementante, agregados, humedad, tiempo de fraguado, catalizadores, etc. Cuando no se dispone del valor de E , pero se dispone del valor de resistencia a la compresión del concreto, f_c se puede obtener una aproximación indirecta a partir de la relación siguiente, en donde E y f_c deben expresarse en unidades MPa [7]:

$$E = 4735\sqrt{f_c} \quad (2)$$

Esta es un método aproximado que permite obtener el valor del módulo de elasticidad, cuando no es determinado directamente. Una vez obtenido, se pueden realizar las estimaciones de esfuerzo y su comparación con la resistencia del concreto.

No obstante, en el caso del concreto cuando está expuesto a cargas de tensión o de flexionantes que le producen esfuerzos tractivos, es importante conocer además la resistencia a la tensión. Como un indicador de la magnitud de tal resistencia, resultados de investigaciones sobre el concreto estiman que el valor de resistencia a la tensión está en general entre 0,07 y 0,11 del valor de resistencia a la compresión, respecto a la compresión, f_c [8]. Aunque en la práctica se pueden encontrar valores menores, con carácter conservador en la estimación de esta resistencia se toma el valor de $0,07f_c$.

3.11 Estimación de límites de deformación

Una manera alterna de expresar las capacidades de resistencia del concreto es por medio de la deformación máxima permisible, tanto a tensión como a compresión, obtenida de las resistencias del concreto.

A partir de pruebas de compresión en 15 muestras obtenidas de pilas y pilotes de la estructura del muelle, se obtuvo el valor de f_c en el intervalo de 22,86 a 50,33

MPa (233 a 513 kg_f/cm²), con un valor promedio de 34,24 MPa (349 kg_f/cm²) y una desviación estándar de 8,83 MPa (90 kg_f/cm²). De acuerdo al coeficiente de variación del 26% de las resistencias, se deduce una alta heterogeneidad en el valor de resistencia del concreto utilizado en el muelle, [9].

Pruebas complementarias en cinco muestras estimaron un valor del módulo de elasticidad, E , en el intervalo de 15,99 a 21,03 GPa (163000 a 214370 kg_f/cm²), con tres de ellas muy cercanas de alrededor de 20,72 GPa (211170 kg_f/cm²) y las dos restantes en aproximadamente 16,3 GPa (166160 kg_f/cm²), [9]. Estos resultados muestran que el primer grupo presenta una mayor resistencia a la deformación que el segundo, por lo que en el primero menores deformaciones podrán producir mayores esfuerzos, mientras que en el segundo, similares niveles de deformación producirán esfuerzos menores.

Los límites de deformación críticos globales estimados se obtienen considerando combinaciones críticas de los valores de resistencia y del módulo de elasticidad. Tomando en cuenta el límite inferior incluyendo la desviación estándar, el valor de f_c es de 25,41 MPa, resultando, por tanto, su valor asociado de resistencia a la tensión en 1,78 MPa (7% de f_c). Combinándolos con el mayor valor de E (20,72 GPa) resultan los límites críticos de deformación unitaria absoluta de 1226 $\mu\delta$ a compresión y de sólo 86 $\mu\delta$ a tensión. Los valores absolutos implican la inclusión de la historia de esfuerzo y deformación de la estructura, adicionales a los valores medidos.

Un criterio menos conservador es tomando el valor de f_c de 34,24 MPa, con resistencia a la tensión estimada en 2,40 MPa y el promedio de E en 18,50 GPa. De acuerdo a estos valores, los límites de deformación unitaria absoluta serían de 1850 $\mu\delta$ a compresión y de 130 $\mu\delta$ a tensión, cerca del 50 % por arriba de los anteriores. No obstante, la heterogeneidad de las propiedades del concreto utilizado en los distintos tramos y en los procesos de rehabilitación genera mayor incertidumbre con estos valores.

3.12 Pruebas de carga

3.12.1 Tramo 2

La Figura 3.26 presenta gráficamente el tipo de respuesta, en términos de deformación, a la carga aplicada sobre el tramo 2. Este ejemplo corresponde a un periodo de registro típico de 600 s, en el que los cambios en el trazo corresponden al paso del vehículo sobre la zona instrumentada, normalmente indicados por uno o varios picos hacia arriba o hacia abajo.

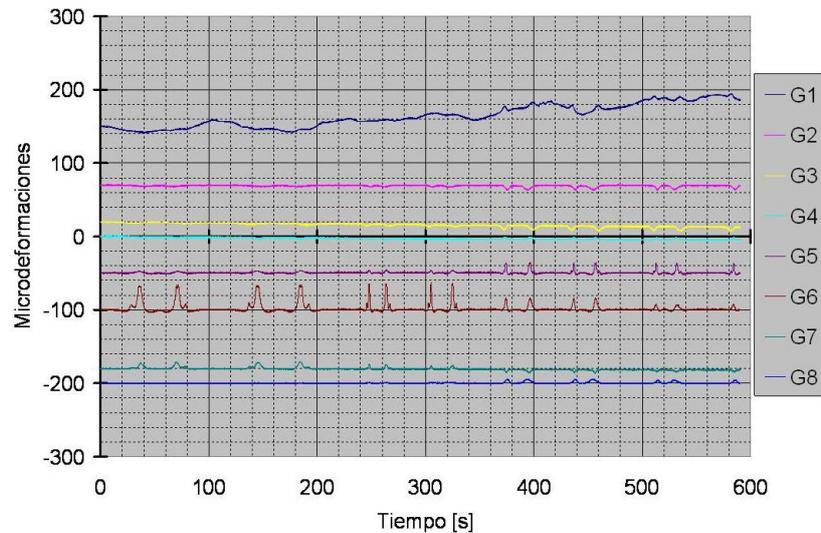


Figura 3.26 Ejemplo gráfico del comportamiento a deformación en el tramo 2. Canales de registros separados verticalmente con propósitos de visualización.

Tomando como registro típico el trazo G6, asociado con la galga colocada en la losa en dirección perpendicular a las traveses, el pico menor corresponde al paso del eje delantero del vehículo y el mayor al par de ejes de carga. Un pico hacia arriba indica que la carga aplicada produce deformación a tensión, mientras que uno hacia abajo denota compresión. Así mismo, los picos más anchos corresponden a las pruebas a muy baja velocidad, (aprox. 2 km/h), mientras que los más agudos a las de velocidad más alta (12 km/h).

Como se ejemplifica en la figura, la galga G1, colocada en la trabe 25, mostró un comportamiento inestable, aunque sensible al paso del vehículo. Este comportamiento sugiere que la estructura de la trabe o los elementos adyacentes a la misma pudieran presentar algún grado de deterioro o discontinuidades como fracturas o grietas incipientes, de manera que su respuesta sufriera un retardo o atenuación con respecto a los otros puntos instrumentados.

Un resumen de las magnitudes máximas de deformación unitaria registradas para cada trayectoria de prueba, indicadas por **P**, se muestra en la Tabla 3.12. La tabla incluye una maniobra de frenado a partir de la velocidad de 12 km/h, así como el máximo intervalo de variación registrado en cada galga durante todo el proceso de prueba (resaltado en gris).

Tabla 3.12 Deformación unitaria [$\mu\delta$] en cada punto para cada posición de prueba en Tramo 2

Galga	Cuasiestático						12 km/h								Frenado		Var
	P1		P2		P3		P1		P2		P3		P4		P3		
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	
G1	1	29	-15	4	-9	10	1	17	-1	23	-5	11	-7	1	-3	6	54
G2	-8	2	-8	2	-3	2	-7	1	-8	2	-4	2	-2	3	-3	2	10
G3	-10	2	-10	1	-6	2	-7	1	-8	2	-5	2	-1	2	-3	2	17
G4	-5	3	-4	4	-4	2	-2	4	-2	5	-3	2	-2	2	-3	2	13
G5	-4	15	-4	16	-3	5	-3	15	-4	16	-3	5	-2	2	-2	5	19
G6	-3	9	-4	18	-5	37	-3	9	-4	22	-5	38	-3	11	-3	37	42
G7	-6	1	-6	2	-2	12	-4	1	-6	2	-2	10	-4	2	-2	11	17
G8	-2	6	-1	7	-1	2	-2	5	-2	7	-1	2	-2	2	-1	2	9

La galga G8, colocada en la trabe 26, tuvo una respuesta estable con mínimos valores de deformación a tensión y a compresión. Comparada con la trabe 25 en la misma zona de instrumentación, evidencia un mejor comportamiento y mayor capacidad de carga que la 25.

Respecto a las pilas instrumentadas con las galgas G2 y G3, se observa que experimentan la mayor deformación a compresión de las colocadas, con valores relativamente bajos. Esto indica que, aún cuando hay evidencia de corrosión en las mismas, no se afectó aún de manera significativa su capacidad de carga.

Respecto a la losa, donde se registraron los mayores niveles de deformación a tensión, éstos se presentaron en la dirección longitudinal del tramo, galgas G5 y G6, mientras que en la dirección transversal al tramo la deformación fue menor (galgas G4 y G7). Esta condición se presentó principalmente cuando el vehículo circuló sobre la segunda línea de columnas, paralela a la pantalla. Estos valores sugieren que la capacidad de carga longitudinal en el tramo es menor longitudinalmente que transversalmente.

De acuerdo a los resultados medidos y conforme a los puntos Instrumentados y la magnitud de carga aplicada por el vehículo de prueba, se observa que en general el tramo 2 presenta bajos niveles relativos de deformación unitaria, con un intervalo máximo de variación de la deformación de 54 $\mu\delta$. No obstante, las estimaciones para la deformación absoluta deben considerar la deformación preexistente debido al peso propio y a otros factores previos a las mediciones, no dentro del alcance de estas pruebas.

3.12.2 Tramo 3

Un ejemplo gráfico de medición típico durante las pruebas en el tramo 3 se presenta en la Figura 3.27. Como se observa, las señales de los extensómetros mantuvieron su estabilidad durante todo el proceso de medición.

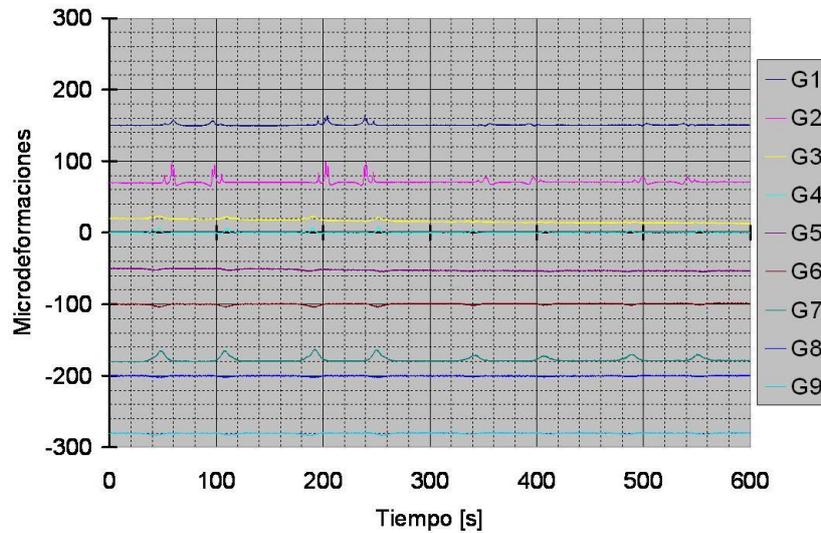


Figura 3.27 Ejemplo gráfico del comportamiento a deformación en el tramo 3. Canales de registros separados verticalmente con propósitos de visualización

Los resultados de deformación unitaria para cada uno de los puntos instrumentados se muestran de manera resumida en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Deformación unitaria [$\mu\delta$] en cada punto para cada posición de prueba en Tramo 3

Galga	Cuasiestáticas								12 km/h								var
	P1	P1	P2	P2	P3	P3	P4	P4	P1	P1	P2	P2	P3	P3	P4	P4	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	
G1	-3	5	-2	14	-2	14	-2	4	-2	6	-2	14	-1	12	-2	4	18
G2	-6	13	-5	30	-6	31	-5	9	-6	15	-5	31	-6	31	-5	10	38
G3	-5	3	-5	6	-5	5	-3	2	-1	4	-2	7	-2	6	-2	2	12
G4	-2	7	-3	9	-2	8	-2	5	-2	7	-2	10	-2	8	-2	4	13
G5	-9	1	-8	2	-5	1	-3	2	-8	2	-7	1	-3	1	-2	2	12
G6	-12	2	-11	2	-5	2	-3	2	-13	2	-11	1	-5	2	-4	1	15
G7	-1	8	-1	15	-1	18	-1	10	-1	9	-1	15	-1	17	-1	10	19
G8	-8	2	-7	1	-3	2	-3	2	-8	2	-6	2	-3	2	-2	2	10
G9	-12	1	-10	2	-4	2	-3	1	-11	1	-9	1	-4	1	-3	1	14
TD1	-1,6	2,1	-1,6	2,1	-0,4	2,1	-0,4	2,1	-1,2	2,4	-0,0	4,9	1,2	4,9	2,4	4,9	6,5
TD2	-1,5	1,6	-8,2	-0,3	-13,1	-7,6	-16,1	-12,5	-9,8	1,2	-21,4	-9,2	-25,0	-20,8	-26,9	-23,8	28,4

TD1 y TD2 expresados en micrómetros [μm]

Los datos de la tabla indican que la galga G2, colocada en la losa, es sujeta a los mayores niveles de deformación, con el mayor nivel de tensión registrado, así como con el mayor intervalo de variación. No obstante, las galgas G1, G3 y G4, en posición similar, no experimentan los mismos niveles de deformación, siendo inferiores a los de G2. Esto sugiere que la integridad de esa porción de la losa presenta posible daño estructural, evidenciado por algunas fisuras incipientes.

Por otro lado, no se aprecia diferencia significativa entre los valores obtenidos de manera cuasiestática o con la segunda velocidad de prueba. En ambos casos, para la magnitud de carga aplicada con el vehículo de prueba, los límites de deformación se encuentran dentro del intervalo de deformación. Estos valores no consideran el estado de deformación previo, lo cual pudiera afectar el estado de esfuerzos absoluto, como lo evidencian las fisuras detectadas durante la instrumentación. Respecto a los desplazamientos verticales, se observa que existen desplazamientos relativos entre los pilotes al aplicar la carga, aunque de baja magnitud, lo cual no representan una condición crítica.

3.12.3 Tramo 4

Un ejemplo típico de la respuesta a la carga aplicada en el tramo 4 en términos de deformación unitaria relativa, se presenta en la Figura 3.28. Puede observarse que el comportamiento de los extensómetros mostró estabilidad en el proceso de medición. En este caso, debido a las condiciones de marea durante el proceso de instrumentación, no fue posible instrumentar la losa.

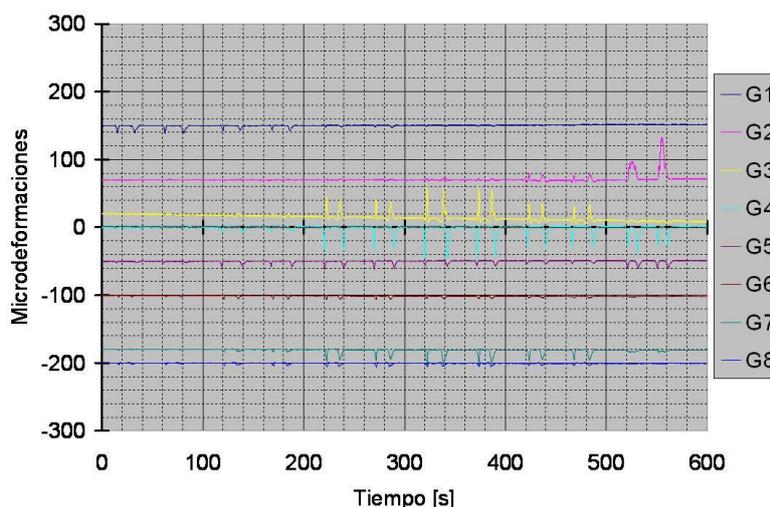


Figura 3.28 Ejemplo gráfico del comportamiento a deformación en el tramo 4. Canales de registros separados verticalmente con propósitos de visualización.

De manera complementaria, en la Tabla 3.14 se resumen los valores de deformación unitaria relativa obtenidos en cada punto instrumentado durante el proceso de prueba sobre tramo 4.

Tabla 3.14 Deformación unitaria [$\mu\delta$] en cada punto para cada posición de prueba en Tramo 4.

Galga	Cuasiestática										12 km/h										var
	P1	P1	P2	P2	P3	P3	P4	P4	P5	P5	P1	P1	P2	P2	P3	P3	P4	P4	P5	P5	
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	
G1	-13	2	-9	3	-3	3	-3	2	-1	2	-13	1	-9	2	-4	2	-2	1	-2	2	16
G2	-1	2	-1	2	-2	2	-2	3	-4	10	-1	1	-2	1	-2	2	-2	4	-5	10	89
G3	-6	1	-8	4	-9	24	-9	43	-6	24	-3	1	-4	4	-7	30	-8	51	-8	23	60
G4	-2	3	-7	4	-34	2	-47	2	-31	3	-2	3	-8	3	-40	1	-51	2	-33	2	55
G5	-3	2	-9	2	-12	2	-9	2	-5	2	-3	2	-10	2	-13	1	-10	1	-6	2	15
G6	-4	2	-7	2	-7	1	-5	2	-4	1	-4	1	-6	1	-6	1	-5	1	-4	1	9
G7	-2	1	-4	1	-16	1	-23	2	-16	2	-2	1	-4	2	-17	2	-25	2	-16	2	27
G8	-3	2	-5	2	-6	2	-5	3	-4	2	-3	2	-5	2	-7	2	-6	2	-4	2	10
TD1	-0,3	19,8	18,6	21,0	19,2	20,4	19,2	20,4	19,2	21,1	-72,4	-44,3	-76,7	-44,3	-45,5	-44,3	-79,1	-44,3	-184,1	-44,3	205,2

TD1 expresado en micrómetros [μm]

En este tramo se observaron intervalos amplios de deformación, tanto a tensión como a compresión. En este caso, el intervalo global de variación incluye la deformación obtenida durante una prueba de frenado realizada como maniobra diagonal a las trayectorias de prueba. Puede observarse que el mayor intervalo de variación registrado, correspondiente a la galga G2, colocada en una trabe, corresponde al límite crítico conservador de deformación absoluta. Otros niveles altos se obtuvieron en la galga G3, colocada también en una trabe, y a la G4, colocada en un pilote, aunque en este último participan valores de compresión relativamente bajos. Tanto G4 como G7 representan pilotes en grupos relativamente aislados, por lo que tienen una mayor participación en el soporte de la carga aplicada en la estructura del tramo.

De acuerdo a los valores de deformación a tensión registrados en las trabes, es posible que la losa esté sujeta durante la operación sobre el tramo también a niveles similares. Este hecho es reforzado también por una mayor magnitud de desplazamiento relativo registrado por el transductor TD1, que demuestra una mayor variación en la dirección vertical entre los dos pilotes en los que se colocó el sensor. En este caso, se observa también un ligero efecto de la velocidad de operación sobre el tramo, incrementando los niveles de deformación. Por tanto, aplicar cargas mayores o de manera intensa en magnitudes similares a la aplicada durante las pruebas, compromete en mayor medida y afecta la integridad estructural del tramo 4.

3.12.4 Tramo 5

Para el caso del tramo 5, la Figura 3.29 presenta gráficamente el tipo de respuesta de deformación a la carga aplicada sobre el mismo. Como resultado de las condiciones durante el proceso de pegado de las galgas, la G11 mostró una adhesión parcial, por lo que no fue incluida en el proceso de medición. Cabe mencionar, por otro lado, que el proceso de prueba en este tramo coincidió con labores de carga de mineral a un buque en ese tramo. Además, al inicio de las pruebas se detectó que la galga G10 en la losa tenía un valor elevado de resistencia eléctrica, producto de una deformación excesiva. La señal en este caso

mostró valores muy por arriba de los correspondientes al intervalo lineal de la galga, por lo que su comportamiento fue descartado en la fase de procesamiento.

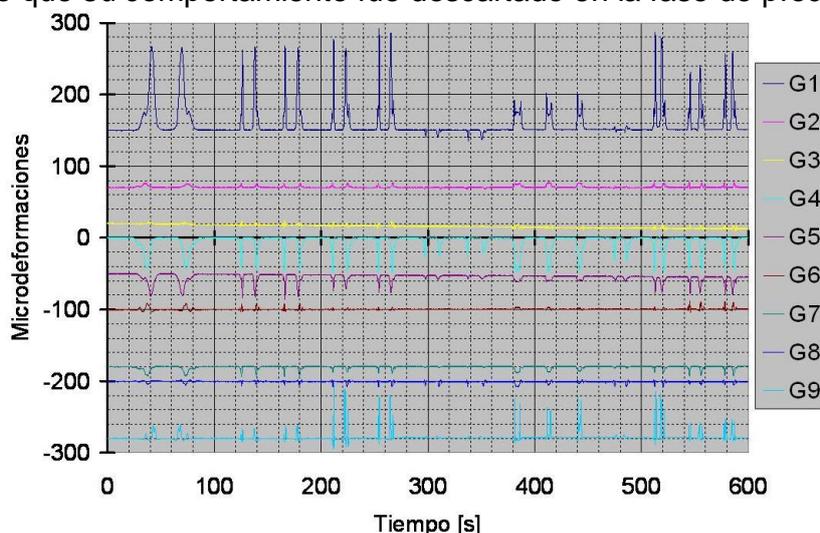


Figura 3.29 Ejemplo gráfico del comportamiento a deformación en el Tramo 5. Canales de registros separados verticalmente con propósitos de visualización

El resumen de los valores de esa deformación para cada punto instrumentado, obtenidos durante el proceso de prueba al circular el vehículo cargado por cada trayectoria indicada, se muestra en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Deformación unitaria [$\mu\delta$] en cada punto para cada posición de prueba en Tramo 5.

Galga	Cuasiestática						12 km/h						Diagonal		var
	P1	P1	P2	P2	P3	P3	P1	P1	P2	P2	P3	P3	Mín	Máx	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	
G1	-19	1	-1	129	-1	120	-16	5	-2	142	-1	118	-2	110	159
G2	-4	2	-2	7	-1	7	-3	2	-1	8	-1	7	-2	8	12
G3	-4	1	-6	6	-2	4	-2	2	-5	7	-5	7	-4	6	16
G4	-23	1	-47	1	-43	2	-32	2	-50	2	-49	2	-47	2	53
G5	-7	1	-26	1	-33	1	-9	3	-25	1	-35	1	-26	1	38
G6	-1	1	-2	4	-4	10	-1	2	-2	4	-3	8	-5	12	18
G7	-2	2	-10	2	-14	2	-4	2	-10	1	-15	1	-14	1	17
G8	-7	2	-8	3	-5	3	-8	3	-8	3	-7	3	-5	4	12
G9	-2	2	-15	71	-8	28	-3	4	-16	74	-6	20	-6	27	90

Como se observa de la tabla, las galgas G1 y G9, colocadas respectivamente en trabe y losa, fueron sujetas a altos niveles de deformación a tensión, por arriba de los niveles de deformación crítica estimados de manera conservadora. Aunque los intervalos de variación para G4 y G5 (en pilotes) son también elevados, su principal respuesta es a compresión, por tanto son considerados valores relativamente bajos para la capacidad del concreto.

Respecto a la velocidad de operación durante las pruebas, se observa poca diferencia en los niveles de deformación, aunque con una ligera tendencia de

incremento para los 12 km/h. De acuerdo a la magnitud de la deformación registrada, se infiere que la carga aplicada por el vehículo está en el límite de operación en el tramo, por lo que una mayor carga y/o mayores velocidades de operación, pudieran generar altas deformaciones y, por tanto, mayor repercusión en la integridad de la estructura en este tramo.

3.12.5 Tramo 6

Para el caso del tramo 6, la Figura 3.30 presenta un gráfico de respuesta típico durante las pruebas de carga.

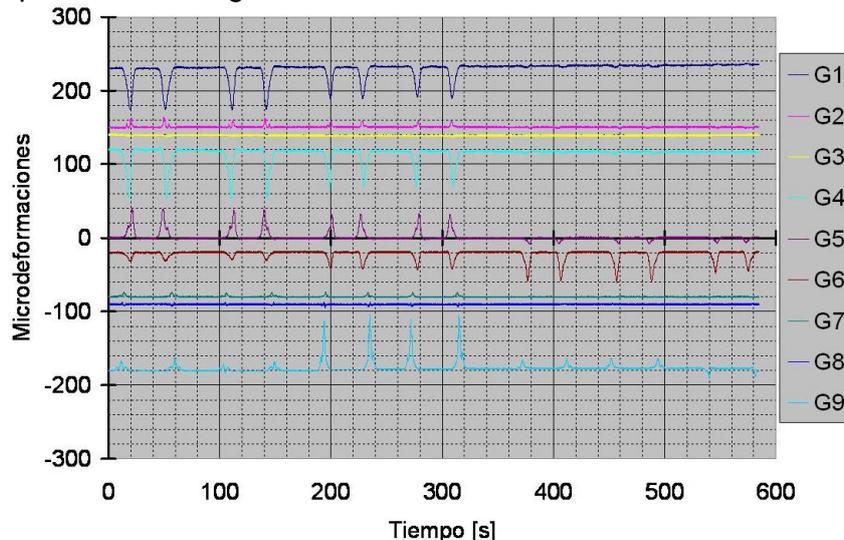


Figura 3.30 Ejemplo gráfico del comportamiento a deformación en el tramo 6.

En la Tabla 3.16 se presenta un resumen de los valores de deformación obtenidos para cada punto instrumentado.

Tabla 3.16 Deformación unitaria [$\mu\delta$] en cada punto para cada posición de prueba en Tramo 6

Galga	Cuasiestática								12 km/h								var
	P1	P1	P2	P2	P3	P3	P4	P4	P1	P1	P2	P2	P3	P3	P4	P4	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	
G1	-2	4	-3	3	-57	4	-57	4	-2	5	-4	4	-47	3	-68	4	73
G2	-2	2	-2	2	-2	15	-2	15	-2	2	-3	2	-2	11	-2	13	18
G3	-2	2	-2	2	-3	2	-3	2	-2	2	-2	2	-3	2	-4	1	6
G4	-3	3	-5	3	-68	4	-68	4	-3	3	-7	3	-50	3	-70	4	74
G5	-8	2	-9	3	-3	40	-3	40	-10	3	-11	2	-4	37	-2	43	54
G6	-29	3	-42	2	-25	2	-12	2	-34	2	-44	1	-26	2	-13	2	47
G7	-1	2	-1	2	-2	8	-1	7	-1	2	-2	2	-2	9	-1	7	11
G8	-1	2	-1	3	-5	4	-3	4	-2	2	-2	2	-5	3	-3	4	9
G9	-13	3	-2	15	-5	76	-5	20	-12	4	-1	18	-1	74	-2	13	89
TD1	-0,7	26,7	-0,9	49,8	-5,4	5,7	-5,4	1,3	-0,7	54,2	-2,2	1,4	-113	0,7	-43,2	1,4	156,3

TD1 expresado en micrómetros [μm]

Como en los tramos anteriores, el comportamiento a compresión muestra muy bajos niveles de deformación comparados con el límite crítico. Así, G1, G4 y G6,

colocados en pilotes, presentan un comportamiento general a compresión y las colocadas en losa, G2, G3 y G8, muestran poca deformación a tensión. Sin embargo, para el caso de las galgas G5 y G9, ambas colocadas en traveses, presentan magnitudes significativas a tensión, con valores muy cercanos al límite crítico superior, particularmente la galga G9 en el que su intervalo de variación, con $89 \mu\delta$, superó ligeramente ese límite. Este aspecto se refuerza con el comportamiento del sensor de desplazamiento, TD1, muy cerca de esa galga y colocado entre uno y otro módulo en ese tramo, que sugiere un movimiento relativo significativo entre ambos.

3.13 Vibración

Los registros de vibración se llevaron a cabo horizontal (H) y verticalmente (V), como historias de tiempo. Estas mediciones se realizaron haciendo circular el vehículo a una velocidad de alrededor de 12 km/h, circulando paralelamente a la orientación de la banda Este. Por cada dirección de medición se tomaron dos registros sobre vitas cercanas a la zona de prueba en cada tramo, a excepción de los tramos 5 y 6, debido a actividades de carga y descarga de un buque durante las mediciones. Para el tramo 2 se realizaron mediciones en las vitas 5, 6 y 7; para el tramo 3 en las vitas 10, 11 y 12; para el tramo 4 en las 18 y 19, y como caso adicional, en la vita 21 para el tramo 5, debido a que el acceso a la instrumentación en el tramo 5 se hacía por la banda Este y además en esa zona no se disponía ya de mayor espacio para las acciones arranque y frenado del vehículo. Las Figuras 3.31a a 3.31e muestran los gráficos de registro del tiempo obtenidos de las mediciones de cada tramo.

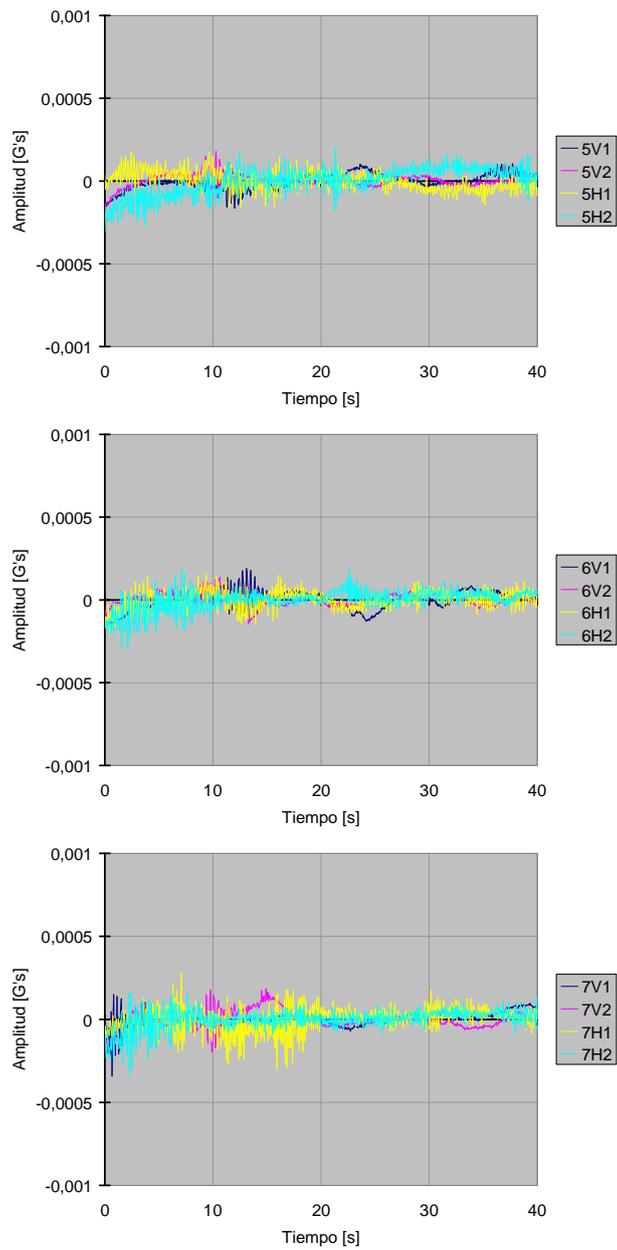


Figura 3.31a. Registro en tiempo durante medición de vibraciones para las vitas 5, 6 y 7 (2).

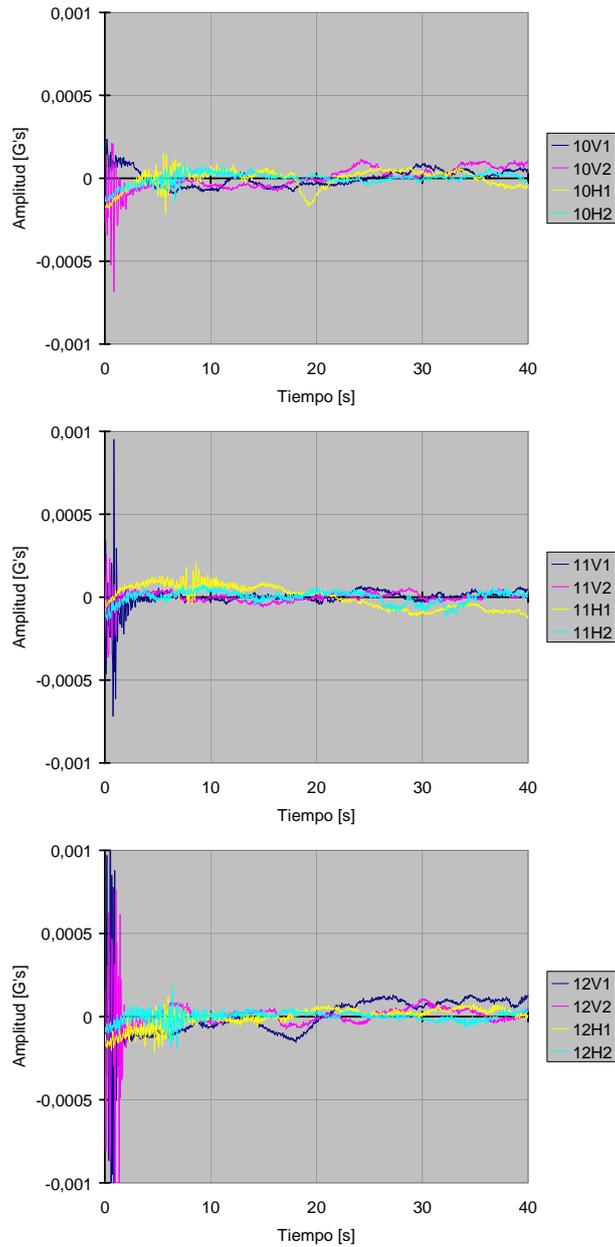


Figura 3.31b. Registro en tiempo durante medición de vibraciones para las vitas 10, 11 y 12 (3)

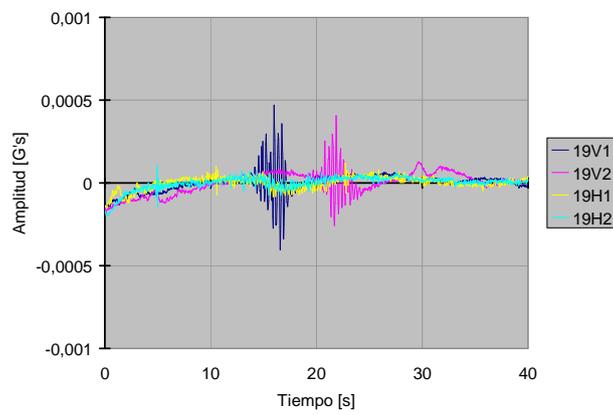
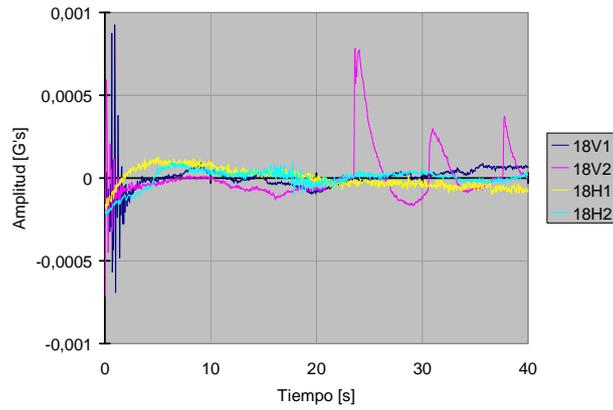


Figura 3.31c. Registro en tiempo durante medición de vibraciones para las vitas 18 y 19 (4)

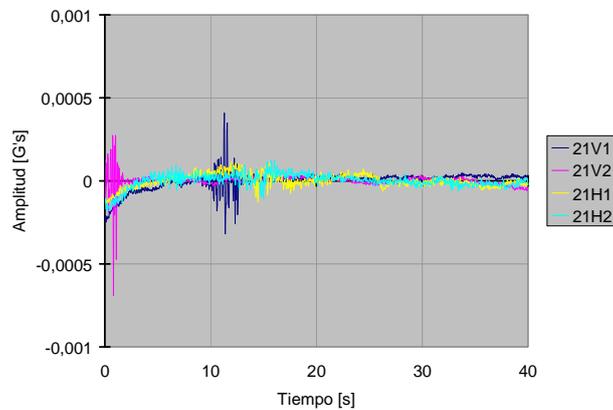


Figura 3.31d. Registro en tiempo durante medición de vibraciones para la vita 21 (cerca a 5).

Como resultado del procesamiento de los datos en los registros de tiempo, se obtuvieron espectros de frecuencia con indicadores de magnitud de PSD (*Power Spectral Density*), como el mostrado en la Figura 3.32.

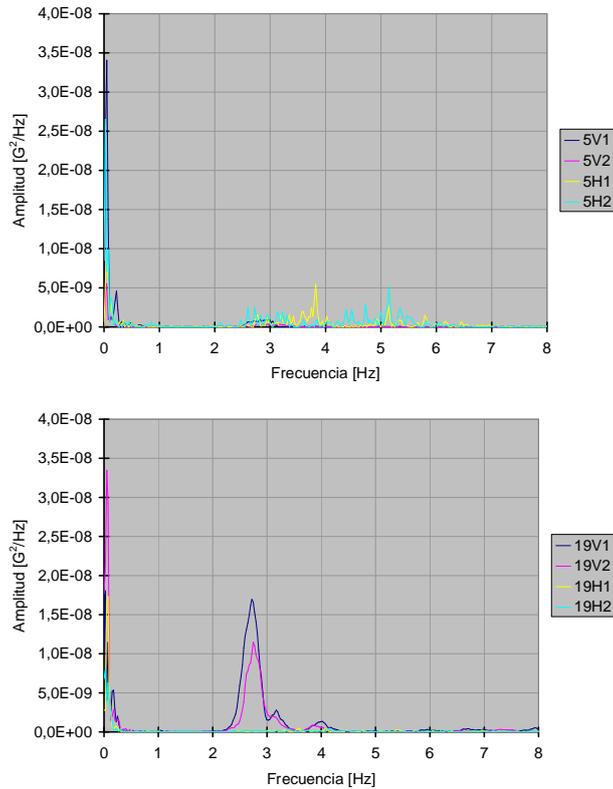


Figura 3.32 Espectros en frecuencia típicos resultantes del procesamiento de datos en tiempo.

Es importante comentar que para las mediciones y registros de vibración se utilizó el paso del vehículo como promotor del movimiento, el cual no tuvo un control estricto de la sincronización de la adquisición y el paso y la trayectoria durante la medición. El movimiento resultante presentó pequeños órdenes de amplitud que, sin embargo, proporcionan información complementaria para el análisis, aunque no se considera concluyente por sí misma debido a los bajos valores de magnitud registrados.

De esta manera, el procesamiento se complementa con el análisis de participación del movimiento en la definición de intervalos de frecuencia, obtenido a partir de los espectros. Este análisis permite observar la manifestación del movimiento por cada intervalo de frecuencia, en este caso, para intervalos de 1 Hz, como se muestra en la Figuras 3.33a a 3.33c, indicando medición en direcciones vertical (V) y horizontal (H).

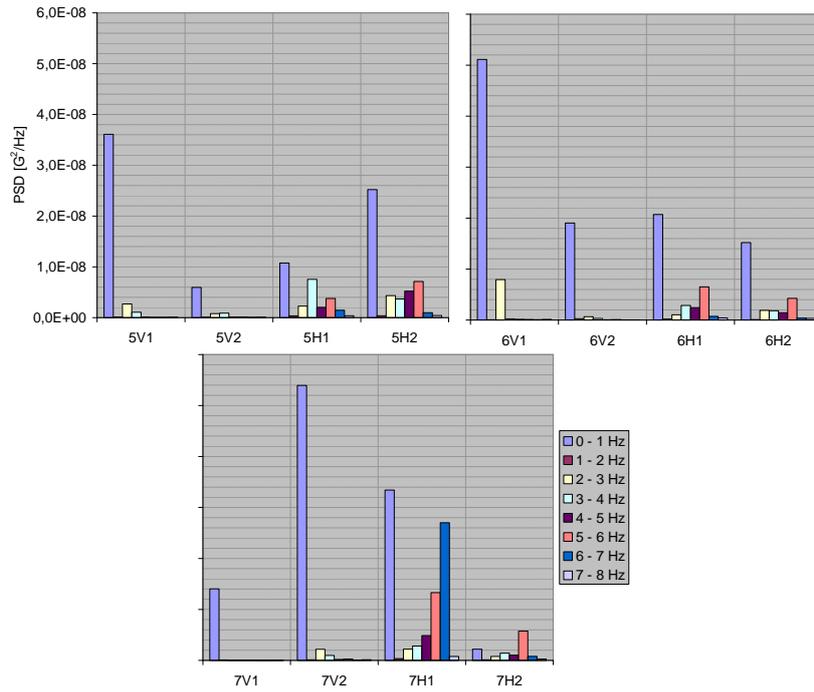


Figura 3.33a. Frecuencias con mayor participación en el movimiento resultante. Vitas 5, 6 y 7 (2)

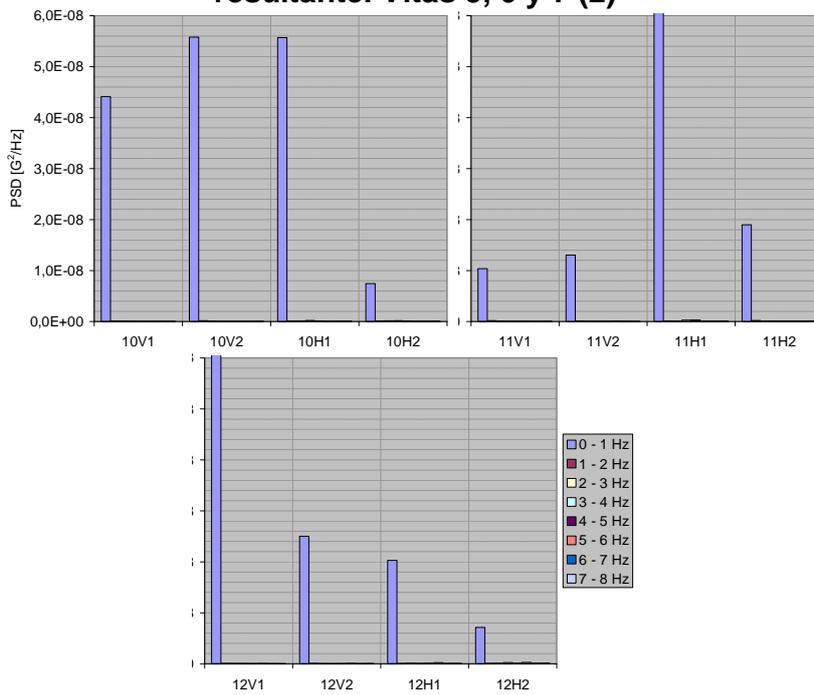


Figura 3.33b. Frecuencias con mayor participación en el movimiento resultante. Vitas 10, 11 y 12 (3)

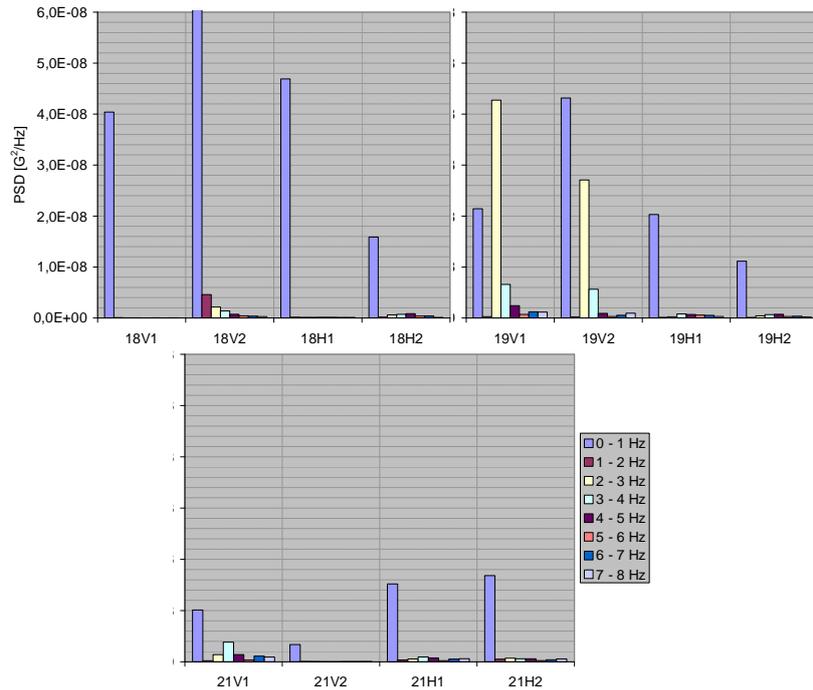


Figura 3.33c. Frecuencias con mayor participación en el movimiento resultante. Vitas 18 y 19 (4), y 21 (cercana a 5)

De acuerdo a los registros en tiempo y el análisis en frecuencia, se identifica que de los tramos considerados el 2 muestra susceptibilidad tanto a movimientos de oscilación horizontal como vertical. Aunque existe un predominio de la participación en el intervalo de 0 a 1 Hz, tanto en dirección vertical como horizontal en las vitas 5, 6 y 7, en la dirección horizontal existe participación de intervalos mayores.

Para el caso del tramo 3, se observa de manera global que el movimiento se manifiesta en el menor intervalo, de 0 a 1 Hz, tanto en la dirección vertical como en la horizontal. Sin embargo, la combinación de la participación en la dirección vertical en conjunto resulta mayor que la horizontal. No así para el tramo 4, en el que aunque el movimiento se refleja con una mayor participación en dirección vertical, aparecen también de manera importante frecuencias en el intervalo de 2 a 3 Hz, como lo muestran las mediciones en la vita 19. Finalmente, en el tramo 5 se observa, aunque en menor proporción comparado este tramo con el resto, mayor manifestación del movimiento en la dirección horizontal.

Los resultados de vibración y su respectivo análisis consideran no sólo la zona instrumentada, sino de manera conjunta el comportamiento de masas globales de los módulos constructivos de la estructura del muelle. Así, aunque los resultados de deformación pueden indicar que la zona instrumentada muestra una mayor

rigidez bajo carga vertical, el conjunto completo puede tener mayor flexibilidad, o viceversa.

3.14 Estimación de capacidad de carga por unidad de superficie, de acuerdo a límites máximos de deformación a tensión

La **capacidad de carga por unidad de superficie** es una acción nominal que mide la intensidad de la descarga de un semieje trasero del vehículo considerado y que está asociada a una geometría que arroja un área tributaria definida ($0,737 \text{ m}^2$)

Los límites de deformación críticos globales se obtuvieron de la combinación de valores de resistencia críticos y del módulo de elasticidad. Valor de referencia de f_c es 25,41 MPa, con valor asociado de resistencia a la tensión de 1,78 MPa (7% de f_c). Combinándolos con el mayor valor de E (20,72 GPa), resultando límites críticos de deformación unitaria absoluta de $1226 \mu\delta$ a compresión y de sólo $86 \mu\delta$ a tensión.

Un criterio menos conservador es tomar el valor de f_c de 34,24 MPa, con resistencia a la tensión estimada en 2,40 MPa y el promedio de E en 18,50 GPa. Los límites de deformación unitaria absoluta serían entonces de $1850 \mu\delta$ a compresión y de $130 \mu\delta$ a tensión. No obstante, la heterogeneidad de las propiedades del concreto utilizado en los distintos tramos y en los procesos de rehabilitación genera mayor incertidumbre con estos valores.

Para la estimación del área de referencia, se considera la correspondiente a un lado de los ejes de carga del camión C3 de prueba (Figura 3.34).

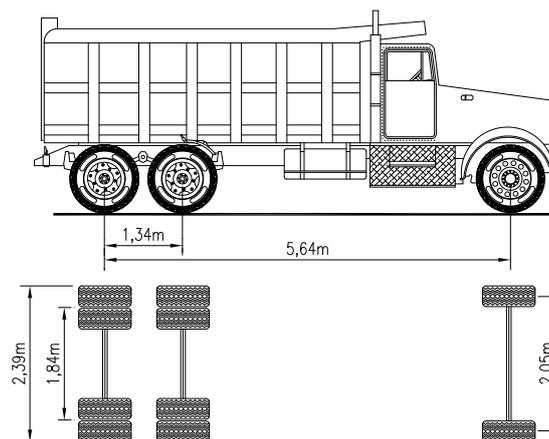


Figura 3.34 Distancias principales entre ejes del camión de carga C3 utilizado

De acuerdo con la figura, las dimensiones para calcular el área de influencia son de una superficie rectangular de 1,34 m de largo (separación entre ejes) y 0,55 m de ancho (cobertura del dual). El área de referencia es, por tanto, 0,737 m².

El pesaje por ejes del camión de prueba dio por resultado un peso global de 304,5 kN (31,05 t). De acuerdo a este pesaje, el eje delantero soporta 58,2 kN (5,93 t), el primer eje de carga 125,9 kN (12,83 t) y el segundo 120,5 kN (12,28 t). Los ejes de carga en conjunto soportaban 246,4 kN (25,11 t), prácticamente el 81% del peso total del camión. Un lado de los ejes de carga soportan, entonces, 123,1 kN (12,55 t).

La densidad de carga correspondiente a esos valores de carga y superficie es de:

$$C_{ref} = 123,1 \text{ kN} / 0,737 \text{ m}^2 = 167 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{ref} = 12,55 \text{ t} / 0,737 \text{ m}^2 = 17 \text{ t/m}^2$$

Los valores estimados de soporte de peso por unidad de área en cada tramo de prueba, de acuerdo a las máximas deformaciones registradas a tensión, se presentan en la Tabla 3.17. Los valores sombreados corresponden a estimaciones por debajo del límite estimado de carga, lo que implica que en esos tramos la resistencia del concreto puede estar por arriba de la estimada en las pruebas de compresión efectuadas con los testigos extraídos.

Tabla 3.17 Capacidad estimada de soporte de carga por unidad de superficie [t/m²]

Muelle	Deformación Máxima Registrada [μδ]	en	Criterio 86 μδ	Criterio 130 μδ
2	42	Losa	34,87 (17,9)	52,71 (27,0)
3	38	Losa	38,54 (19,8)	58,26 (29,9)
4	89	Trabe	16,45 (8,4)	24,87 (12,8)
5	90	Losa	16,27 (8,3)	24,60 (12,6)
	159	Trabe	9,21 (4,7)	13,92 (7,1)
6	18	Losa	81,36 (41,7)	122,98 (63,1)
	89	Trabe	16,45 (8,4)	24,87 (12,6)

Valores sombreados, sobrepasan límites estimados.

Caber reiterar que la estimación de los valores criterio ($86 \mu\delta$ y $130 \mu\delta$) implican un intervalo de resistencia que puede ser rebasado en algunas zonas del muelle, es decir, valores por abajo y por arriba de los indicados. Esto, tanto por la presencia de zonas de reparación y obras previas, así como a las diferentes técnicas de reconstrucción, espesor de losa o refuerzo colocado.

Se observa de la tabla que los mayores valores de deformación corresponden a menores capacidades de carga en los muelles. Debido al menor espesor y capacidad de carga, las losas requieren mayor atención que las trabes, en este sentido, para el tramo M5 se estiman las menores capacidades de carga. No obstante que en el tramo M6 los valores en la losa corresponden a estimaciones de soporte muy altos, en ese tramo se observaron discontinuidades y deterioro en zonas adyacentes, particularmente bajo la estructura de descarga de granel, lo que son indicador de una gran heterogeneidad en la estructura.

En la Tabla 3.17, columnas 4 y 5, se presentan estimaciones de capacidad de carga en paréntesis. En estas se consideran un factor de carga recomendado que no debería ser menor de $FC = 1,5 \times 1,3 = 1,95$ según reglamento NTC del DF.

Puesto que los puntos de medición se realizaron en zonas específicas para el caso de zonas adyacentes con espesores de losa distintos, se recomienda los siguientes factores multiplicadores, los cuales se toman como referencia en una losa de 35 cm de espesor:

TABLA 3.18 Factores multiplicadores por cambios en espesor de las losas

Espesor de Losa (cm)	Factor Multiplicador
15	0,15
25	0,30
35	1,00

Los factores anteriores de la Tabla 3.18 deben aplicarse para losas con espesores menores a 35 cm. Como pudo observarse en el levantamiento de daños, se encontraron en un mismo muelle losas con distintos espesores, por lo que estos factores debieran considerarse teniendo el dato del espesor de las losas en revisión. Por ejemplo, si en el muelle 6 se tiene una losa de 15 cm de espesor, la capacidad de carga que en Tabla 3.17 es de $41,7 \text{ t/m}^2$ cambiaría a $6,3 \text{ t/m}^2$ únicamente. Estos factores multiplicadores fueron estimados considerando la distribución del acero de refuerzo encontrado en los sitios explorados.

4 Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Discusión general

De acuerdo a la información que se proporcionó, desde la construcción de los primeros tramos a mediados de los años 50s, el muelle del puerto de Guaymas fue objeto de ampliaciones y reparaciones en diversas ocasiones, siendo la más reciente la efectuada en 1996. Producto de estas intervenciones, el muelle presenta gran heterogeneidad en cuanto al concreto utilizado en las diferentes etapas, así como en los tipos de reparaciones efectuadas en la mayor parte de los pilotes. Lo anterior explica la variación en los resultados de los ensayos.

Las actividades de reconocimiento del muelle y del desarrollo de la instrumentación y pruebas permitieron registrar algunas observaciones relacionadas con las condiciones estructurales aparentes y de operación del muelle. Un aspecto importante es el hundimiento que sufre el recinto fiscal, el cual muestra mayor evidencia en la parte de tierra de la convergencia entre las bandas Este y Sur. Este hundimiento generó la fractura y deterioro de la zona de maniobras, la cual fue reparada con la colocación de una losa sobre la existente, como se observa en la Figura 4.1.

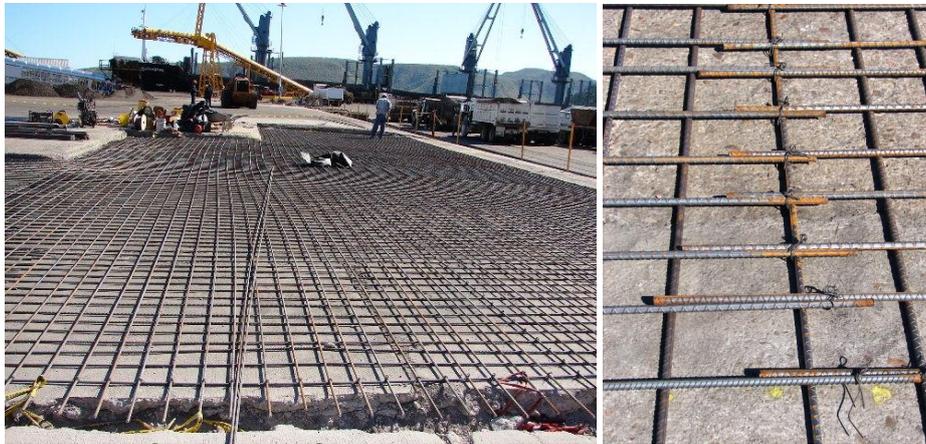


Figura 4.1 Í SobrelosaÍ como reparación en zona de hundimiento

Existe la posibilidad, además, de que durante las operaciones de carga en el muelle, se generen impactos al depositar material sobre la superficie de los tramos, lo que conlleva a la generación de fisuras en la parte inferior de la losa. Estas fisuras fueron observadas durante la fase de instrumentación, tanto en las zonas instrumentadas como en otras porciones del tramo. A su vez, estas fisuras

van propagándose y reflejándose tanto en la parte superior como en la inferior de la losa, dando lugar a zonas de filtración, como se muestra en la Figura 4.2. Esto, aunado con defectos de reparación y/o algunas eventualidades de incidentes en el manejo de cargas o maquinaria que dañe físicamente la estructura, promueven condiciones de deterioro acelerado de los componentes de la estructura del muelle en algunas porciones.



Figura 4.2 Grietas, fisuras y defectos promotores de filtraciones y deterioro en losa

Estas discontinuidades físicas en la estructura de cada tramo, limitan el proceso de medición y los resultados respectivos. Además, el proceso de instrumentación tuvo limitantes por los cambios naturales en marea y ambiente, por la operación misma del muelle y por el acceso complicado a otros puntos bajo la estructura. Estas situaciones obligaron a la selección de puntos en zonas de instrumentación que, dentro de esas limitantes, facilitaran el proceso, la ejecución de pruebas y la medición.

Los resultados de deformación, conjuntados con los de pruebas mecánicas del concreto, son un indicador directo de la capacidad de carga de la estructura. La

magnitud de la carga aplicada con el vehículo seleccionado, es una adecuada aproximación de la carga que se maneja con ese tipo de vehículos. La carga soportada por el par de ejes de carga en la parte posterior del camión, 246 kN (25 t) se distribuye en la zona de contacto de las llantas con el piso. Este vehículo se hizo circular sobre trayectorias rectas sobre las zonas de instrumentación. Sin embargo, la ubicación de esas trayectorias no necesariamente representan los puntos críticos para la aplicación de la carga sobre la estructura. Así mismo, el paso de vehículos simultáneos sobre el muelle, o la aplicación de otras cargas durante la operación, pueden ocasionar que los niveles de deformación y, por tanto, de esfuerzos, sean mayores que los valores medidos.

Como ejemplo se cita el evento en la zona de prueba del 5, en el que esa zona debió entrar en operación por necesidades de carga de un buque después de colocada la instrumentación, por lo que las pruebas debieron ser pospuestas. Eso originó que las galgas colocadas estuvieran expuestas a niveles de carga mayores a la aplicada con el vehículo de prueba, produciendo en una de ellas colocada en la losa (G10) que sufriera una deformación permanente, rebasando sus capacidades nominales de medición (la resistencia nominal de la galga es de 120 Ohms, y la registrada previo al inicio de las pruebas fue de 136 Ohms. Para el tipo de galga utilizada, una deformación en el intervalo lineal de 3000 $\mu\delta$ equivale a poco menos de 1 Ohm de cambio en la resistencia eléctrica de la galga. Esto pudo reforzarse con la presencia de pequeñas fisuras cercanas a los puntos instrumentados.

Por otro lado, las estimaciones de los límites de deformación partieron de valores representativos de las propiedades del concreto, obtenidas de un muestreo general. Estos valores de resistencia presentan gran variabilidad, resultando en una estructura heterogénea mecánicamente.

Considerando esos aspectos y las mediciones de deformación, principalmente, y de vibración, complementariamente, se observa que los tramos 2 y 3 presentan de manera global una mayor capacidad de carga vertical que el 4, el 5 y el 6. Sin embargo, el 2 presenta mayor susceptibilidad a movimiento lateral horizontal que los demás tramos, debido posiblemente a una mayor separación entre las pilas de soporte y su verticalidad, comparado con los otros tramos. Debe notarse, no obstante, que los niveles de deformación a tensión representan una condición que puede ser crítica, particularmente en la parte inferior de las trabes y de la losa en los distintos tramos.

4.2 Resistencia del concreto

En general, aunque se registraron valores de esfuerzo menores a 250 kg/cm², la resistencia a compresión puede esperarse superior a la resistencia de proyecto si se toma en cuenta, como ya se comentó, el pequeño diámetro de los núcleos con respecto al tamaño del agregado encontrado, consideración que se respalda con

los índices esclerométricos que arrojan buenos resultados. Sin embargo si es notable las importantes variaciones y los pesos volumétricos y módulos de elasticidad bajos, lo que evidencia que tanto en los pilotes originales como en las reparaciones el concreto no posee características de durabilidad efectiva. Está la excepción de las reparaciones coladas con la mezcla de grout y agregado grueso, las cuales han tenido un mejor comportamiento hasta el momento, si bien en muchos casos los potenciales de corrosión obtenidos son relativamente altos en la zona de variación de mareas y a simple vista se observan delgadas fisuras en algunas de ellas.

En correspondencia con la baja calidad del concreto, los ensayos de resistencia a tensión por adherencia también arrojan bajos valores en promedio. Se recomienda que si se toma la decisión de reforzar los elementos mediante cualquier técnica o procedimiento en donde esté en juego la adherencia, los trabajos de preparación de la superficie del concreto, ya sea por procedimientos de desbaste o blasting, contemplen un retiro de material hasta una profundidad que presente mejor resistencia y calidad.

4.3 Contaminación del concreto

Dado que la edad del muelle ya ronda los 50 años y que como se comprobó, los concretos utilizados no han sido concebidos para ser durables, altos niveles de cloruros, en conjunto con el frente de carbonatación, ya han alcanzado en general altas profundidades en el concreto. Las reparaciones han mitigado los problemas temporalmente aunque algunas han sido poco exitosas, tal es el caso de las reparaciones dañadas coladas con concreto convencional y armado adicional colocado con poco recubrimiento, aunque debe decirse que a pesar de encontrarse con severa corrosión, este acero también funcionó como sacrificio al deteriorarse y proteger al acero original de los pilotes. Las reparaciones hechas con grout y sin acero de refuerzo adicional han funcionado mejor y a pesar de que las muestras de polvo indican contenidos altos de cloruro hasta los 12 cm, el acero original de los pilotes se encuentra en general a mayor profundidad debido a la sección circular de estas reparaciones.

Por otro lado, de la verificación de armados con el equipo detector y de la inspección visual, se encontraron recubrimientos con variación importante, tanto en las reparaciones como en las pilas del Módulo XXIII. En éstas últimas, los recubrimientos encontrados indican que los armados quedaban fuera de posición al momento de realizarse el colado, dejando en ocasiones en un lado de la pila espesores de recubrimiento de 3 a 4 cm, mientras que en el lado contrario pueden encontrarse espesores de hasta más de 10 cm. Aunado a esto, la presencia de panaleras en la superficie facilitaron el acceso de los contaminantes y dieron origen prematuro a los problemas de corrosión.

4.4 Potencial de corrosión

El área más contaminada por cloruros y con presencia de humedad constante, verificada con las lecturas de potencial, comprende una sección de 40 a 50 cm medida hacia arriba a partir del nivel aproximado de marea alta. En esta área, tanto en reparaciones como en pilotes sin intervención, más del 90% de las lecturas estuvieron por debajo de los . 200 mV, y de ellas, alrededor del 70 % se encuentran por debajo de los . 350 mV. Lecturas también bajas y generalizadas, aunque en menor grado, se extienden todavía hasta una altura de 1 m encima del nivel de marea alta.

Por otro lado, salvo puntos aislados, las trabes dieron lecturas con bajo potencial, lo que se coincide con los bajos niveles de cloruros encontrados en las muestras de polvo extraídas de las losas. De ahí que los problemas locales de corrosión que se encuentran en estos elementos se deben principalmente a bajos recubrimientos y a irregularidades en la superficie producidas por la falta de compactación del concreto. Esto mismo sucede con los pocos daños que se han presentado en la estructura de la pantalla del muelle.

4.5 Pruebas de carga

Como resultado del proceso de instrumentación, de pruebas y su medición en los distintos tramos del muelle del recinto fiscal de API Guaymas, se desprende lo siguiente:

Existe una gran heterogeneidad en la condición y propiedades del concreto utilizado en la estructura del muelle. Esto fue producto de la aplicación de diversos procesos de rehabilitación previos que, a su vez, reflejaron defectos constructivos en la estructura del muelle. Estos defectos participan en las condiciones de deterioro estructural del muelle, principalmente en los tramos 3, 4, 5 y 6.

De los seis tramos que componen el muelle, el 2 y el 3 mostraron los menores niveles de deformación, cuyos intervalos de variación se mantuvieron por abajo de los posibles límites de deformación crítica a tensión ($86 \mu\delta$). Para la misma carga vertical aplicada con el vehículo de prueba, en algunos puntos de medición en los tramos 4, 5 y 6, ese valor fue rebasado.

Los niveles de deformación registrados reflejan en general que los tramos 4, 5 y 6 poseen una menor capacidad de carga actual que el 2 y el 3. No obstante, las mediciones de vibración indican que el tramo 2 presenta una ligera susceptibilidad a movimiento horizontal transversal, mientras que el 3 y el 4 al vertical. Las mediciones parciales en 5 mostraron susceptibilidad a movimiento en ambas direcciones, vertical y horizontal. Para el caso de 6, no se cuenta con datos de vibración. En general, las condiciones físicas y ambientales de la zona donde se

ubica el recinto, así como las actividades de operación sobre los tramos, pueden afectar la condición actual de la capacidad de estos tramos.

Las estimaciones de los límites de deformación críticos se obtuvieron de valores de resistencia de muestras de concreto de la estructura del muelle. Estos valores presentaron gran diversidad, lo que representa una condición de heterogeneidad de propiedades en toda la estructura. Así mismo, las mediciones de deformación con la aplicación de la técnica de extensometría, como técnica no destructiva, no consideran el estado de deformación previo a las mediciones. Por tanto, los valores de deformación absoluta no pueden ser obtenidos de esta manera.

Con estas pruebas se determinaron las cargas máximas permitidas por unidad de área en los tramos que conforman el muelle. Los valores estimados variaron entre 12,3 y 63,1 t/m² considerando una losa de 35 cm de espesor. Variaciones en la capacidad de carga por diferencias en sus espesores fueron estimadas también mediante un factor de reducción (Tabla XXIII) y deberán utilizarse cuando los espesores sean menores a 35 cm.

4.6 Reparación de daños

En vista de que las reparaciones efectuadas en el muelle no han tenido la vida de servicio esperada y a que se han presentado daños en las secciones no intervenidas de pilotes, pilas, losas y trabes; las siguientes recomendaciones tienen la intención de proporcionar una base para una rehabilitación que detenga con mayor efectividad el deterioro por corrosión y proporcionen una expectativa de servicio mayor.

4.6.1 Pilotes / Pilas sin reparaciones previas

Debido a que el contenido de cloruros y las lecturas de potencial de corrosión resultaron ser altas en la mayor parte de los sitios muestreados, la rehabilitación requiere de procedimientos que prevengan la formación de nuevas zonas de corrosión y así evitar futuras reparaciones a corto plazo.

El procedimiento recomendado es aplicable tanto a las pilas y pilotes que no han sido reparados como a las secciones originales dañadas de pilotes que ya cuentan con encamisados de reparación:

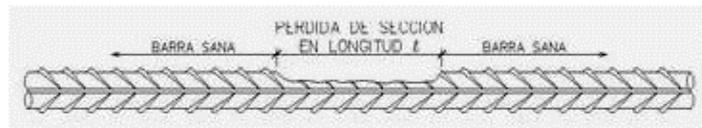
1. Tomando como base el levantamiento de daños realizado, sondear acústicamente mediante golpeteo con martillo las zonas dañadas y áreas adyacentes para delimitar las zonas a intervenir. Toda superficie en que los impactos emitan un sonido que sugiera la presencia de oquedades con respecto a una zona completamente sana, deberá ser considerada como área deteriorada. Una vez marcadas las partes que requerirán el retiro de concreto, se procede a realizar un trazo definitivo para reparación. Éstas

zonas deberán ser lo más simple posible y de geometría regular, tratando de formar ángulos rectos en las aristas.

2. Una vez hechos los trazos, los límites de éstos deberán prepararse usando cortadora de disco. El corte debe efectuarse manteniendo el disco siempre perpendicular a la superficie y penetrando una profundidad de al menos 1.5 a 2 cm o lo mínimo necesario para no dañar el acero existente.
3. Para retirar el concreto en el área demarcada por los cortes deben usarse martillos neumáticos o eléctricos de pequeñas dimensiones (máximo 20 libras o 10 kg de peso) para evitar debilitar el concreto sano (microfisurar) o lastimar el acero de refuerzo. La remoción debe hacerse siguiendo los cortes hechos con disco, tratando de respetar los contornos y de formar una especie de caja con ángulos rectos (a 90°) en la parte más profunda. Debe revisarse que el equipo no tenga desperfectos que puedan significar un derrame de aceites o grasas que contaminen el área y puedan poner en riesgo la adherencia con los materiales de reparación. La remoción debe hacerse hasta una profundidad de al menos 2 cm por detrás del acero corroído para que éste pueda ser limpiado en su totalidad. Es importante tomar en cuenta que cuando se comiencen a demoler las partes delimitadas con este procedimiento, es muy probable que se encuentren con casos en que exista acero corroído más allá del contorno identificado y por lo tanto, el área de reparación tenga que aumentar. Por ello, las áreas indicadas en el levantamiento de daños podrían diferir significativamente de las cantidades reales. Así, cuando más allá de los bordes del área demarcada se encuentra que el acero presenta corrosión, la remoción de concreto debe continuar al menos 10 cm después de encontrar acero sano. Los bordes de esta nueva remoción también deben perfilarse con la cortadora de disco como se describió anteriormente.
4. Dependiendo de la gravedad de los daños y la magnitud de la intervención, es muy importante que se tomen las debidas precauciones durante estos trabajos en lo referente a un apuntalamiento adecuado de la losa o trabes alrededor de la pila o pilote que vaya a ser afectado. El apuntalamiento no deberá retirarse hasta que la reparación esté concluida y que el material de reparación haya alcanzado al menos el 80% de su resistencia. También se recomienda alternar los ejes tanto transversales como longitudinales de las pilas a rehabilitar para no concentrar demasiado el debilitamiento de la estructura.
5. Limpiar completamente el acero de refuerzo utilizando chorro de agua (libre de cloruros) a alta presión (hidroblast) o en su defecto, chorro de arena a

presión (sandblast), hasta retirar completamente el óxido en toda su superficie.

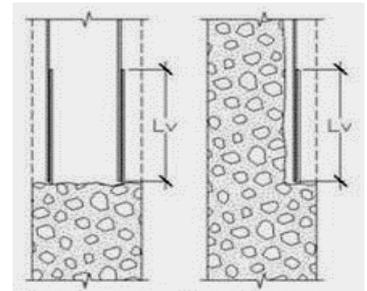
6. Después de que el acero esté completamente limpio, deberá verificarse si existe pérdida de la sección transversal del mismo. Tanto para el acero longitudinal como transversal, en donde haya más de un **15% de pérdida del área (no del diámetro) de la sección**, deberá reforzarse ésta añadiendo acero nuevo del mismo diámetro y de las mismas propiedades.



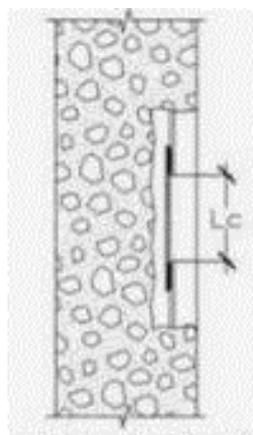
En casos de pérdida casi total del acero, lo mejor es sustituirlo completamente en la sección deteriorada.

7. Hay varias alternativas para reforzar o reemplazar el acero dañado:

- a. Traslapes simples: La longitud de empalme debe de ser de al menos una longitud de 40 diámetros de la varilla cuando menos del 50% del acero en la misma dirección y en la misma zona esté dañado y 60 diámetros cuando el porcentaje sea mayor.



- b. Soldando empalmes: Es un procedimiento más complicado pero evita tener que demoler grandes áreas de concreto como en el caso anterior, debido a que las longitudes de traslape son mucho más pequeñas. La tabla siguiente muestra las longitudes requeridas dependiendo del tipo de soldadura empleado:

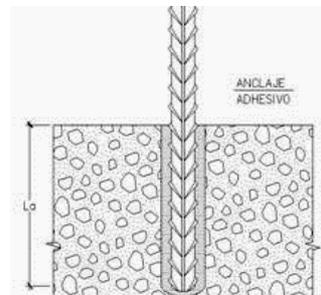


BARRA (ø)	AREA (cm ²)	t (pulgadas)	Ls (cm)	
			TIPO I	TIPO II
3/8"	0.71	3/16"	6.0	3.0
1/2"	1.29	7/32"	7.0	3.5
5/8"	2.00	1/4"	9.5	5.0
3/4"	2.84	9/32"	12.5	6.5
7/8"	3.87	5/16"	15.0	7.5
1"	5.10	11/32"	21.0	10.5
1 1/8"	6.45	3/8"	26.0	13.0
1 1/4"	7.92	7/16"	32.0	16.0
1 3/8"	9.58	1/2"	38.0	19.0

TIPO I

TIPO II

- c. Uso de conectores: Hay disponibles en el mercado sistemas de conectores prefabricados. Es un procedimiento un poco más caro pero evita casi por completo la remoción excedente de concreto, por lo que suelen ser adecuados y por norma no se debe emplear conectores tipo abrazaderas porque no transmiten las cargas adecuadamente, por lo tanto **la recomendación final de este trabajo es usar conectores mecánicos debido al diámetro de las varillas.**



- d. Anclajes: Habrá ocasiones en que debido a que no exista longitud suficiente del acero existente, no pueda ser posible la realización de un empalme o el uso de conectores. Esto suele ocurrir en los extremos dañados de las pilas, pilotes o trabes. En estos casos, una posible solución es anclar las varillas al concreto sano existente mediante el uso del adhesivo epóxico especial para anclajes tipo Sikadur Anchor Fix 4.
8. Hechos todos los trabajos que se hayan requerido para reponer el acero con pérdida de sección, el siguiente paso es limpiar toda la superficie del concreto también mediante hidroblast hasta dejarla completamente limpia, es decir, libre de polvo, material dañado, débil o suelto, grasa o cualquier otro contaminante.
9. Una vez realizados los trabajos de remoción y limpieza, únicamente cuando los daños reparados estén presentes en los primeros 60 cm arriba del nivel mínimo de marea, se colocaran ánodos Bulk de zinc tipo Vector, sujetándolos al acero de refuerzo utilizando los conectores integrados y de acuerdo a las especificaciones del fabricante. Se colocará un único ánodo Bulk de zinc por pilote o pila reparada.
10. Aplicar tanto al acero de refuerzo como a la superficie de adherencia del concreto, un mortero epóxico-cemento tipo SikaTop Armatec 110 Epocem como puente de adherencia e inhibidor de corrosión. Colocar a dos capas sobre el acero de refuerzo y a una capa en la superficie de concreto. La aplicación puede realizarse utilizando brocha de pelo duro.
11. A partir de este punto, la recuperación de la sección se recomienda ser efectuada de dos formas dependiendo del tamaño de la zona a reparar. En

cualquiera de los casos, la recuperación de la sección deberá ser tal que el recubrimiento mínimo para el acero sea de 6 cm.

4.6.2 Losas y Trabes. Áreas pequeñas y locales

La recuperación de la sección se realizará con el mortero de reparación tipo SikaTop 122 que está elaborado a base de cemento y agregados controlados, resinas acrílicas, fibras sintéticas y tiene características similares a las de un concreto estándar en cuanto módulo de elasticidad y coeficiente de dilatación térmica, además de presentar baja permeabilidad y buena resistencia al desgaste. Es preciso garantizar una buena adherencia entre el concreto existente y el mortero de reparación, **por lo que es indispensable aplicarlo mientras el puente de adherencia (Sikatop Armatec 110) se encuentre aún fresco**. Seguir las indicaciones de colocación de la hoja técnica del producto.

4.6.3 Losas y Trabes. Áreas grandes o de daños generalizados

En realidad, el procedimiento puede ser similar al caso anterior, sin embargo éste resulta ser demasiado lento en áreas de mayor tamaño ya que la colocación de los morteros de reparación debe realizarse detalladamente en pequeñas capas para evitar desprendimientos por su propio peso. Una mejor alternativa es utilizar cimbras y colar la sección con un mortero predosificado tipo SikaGrout sin contracción que puede ser preparado con fluidez para asegurar un colado sin defectos (**indispensable no utilizar más de la cantidad de agua requerida para lograr fluidez media de acuerdo a la hoja técnica del producto**). En reparaciones mayores a 5 cm de espesor, al SikaGrout puede adicionársele un máximo de 30% en peso de gravilla de ½φ

4.6.4 Pilotes

Emplear un concreto cuyo diseño tenga una baja relación agua/cemento, baja permeabilidad y excelente trabajabilidad. En términos generales, lo más recomendable es diseñar un concreto con un aditivo hiperfluidificante (para elaborar un concreto autocompactable y disminuir el riesgo de la formación de oquedades) y reductor de agua de alto rango como los del tipo Sika Viscocrete. Una recomendación para el diseño de este concreto es la siguiente:

- Tamaño máximo de agregado = 1/2 de pulgada
- Cemento CPO 40 R
- Contenido mínimo de cemento de 380 kg por m³ de concreto
- Adicionar un 5 a 8% de Sikacrete 950 DP (Microsílica) con respecto al peso del cemento
- Relación agua-cemento menor a 0,40
- Consistencia autocompactable.

Cualquiera que sea el material elegido, el colado debe realizarse de preferencia mientras el SikaTop Armatec 110 se encuentre aún fresco para aprovechar las ventajas como puente de adherencia. Por ello, es recomendable que las cimbras deban ser prearmadas y listas para su colocación rápida. Dichas cimbras además deberán ser lo suficientemente estancas para impedir la salida del material (es conveniente sellar los bordes con tiras de caucho o neumáticas) y ser impregnadas con algún desmoldante adecuado (por ejemplo, Separol o Sika Desmoldante).

El colado puede realizarse utilizando una manguera de 2 o 2-1/2 pulgadas. El vertido con la manguera debe hacerse por un orificio en la parte superior de la cimbra el cual debe estar al menos 10 cm arriba del nivel superior de la reparación. La manguera debe introducirse lo más abajo posible en la reparación para depositar el material en el fondo e ir subiendo poco a poco conforme se vaya llenando. Un buen procedimiento de vibrado es fundamental para evitar la formación de oquedades que permitirían el ingreso de los contaminantes y con ello el fracaso de la reparación. Una sola abertura en la cimbra para la colocación del grout o concreto no siempre es suficiente, habrá que diseñar las necesarias para asegurar que el concreto se desplace a toda el área de reparación.

Cuando se presenten daños en la parte alta de las pilas o pilotes, donde se conectan a la losa del muelle, es recomendable colar la sección vertiendo el material desde arriba de la losa, haciendo perforaciones en ella para introducir la manguera y verter el material. De esta manera se evita que se presente discontinuidad en la conexión pila-losa. Este procedimiento será necesario particularmente en la reparación de los capiteles ubicados en los primeros ejes de pilotes de la cara sur en la Banda Sur del muelle (módulos V, VI, VII. Ver figuras 25 y 26).

Una vez recuperada la sección cualquiera que sea el material empleado, no debe de pasarse por alto un buen procedimiento de curado por lo menos durante 7 días. El curado es imprescindible para evitar la formación de fisuras por contracción en el material de reparación.

Es necesario que los trabajos de rehabilitación sean acompañados de acciones correctivas de prevención. Por ejemplo, el reemplazo e impermeabilización del perímetro de los drenes, así como la colocación de un sistema adecuado de juntas impermeables para impedir la filtración de agua en las juntas constructivas localizadas entre dos tramos consecutivos de muelle.

Para la consulta de los procedimientos y condiciones de aplicación detallados de cada uno de los productos que intervienen en este documento, revisar las hojas técnicas respectivas

4.6.5 Pilotes con reparaciones previas

Debido al severo deterioro del acero de refuerzo de los encamisados con que fueron reparados algunos pilotes, se recomienda que sea retirada la totalidad del concreto perimetral junto con todo el acero dañado. Con la finalidad de examinar su condición y retirar el concreto que lo recubre, el cual probablemente está demasiado contaminado con cloruros, la remoción es recomendable realizarla hasta descubrir el acero de la sección original de los pilotes, continuando hasta una profundidad de al menos 2 cm por detrás del mismo para que pueda ser examinado y saneado totalmente en caso de presencia de corrosión. El retiro de material en la sección original del pilote debe hacerse también con equipo ligero para no debilitar la sección del elemento. La limpieza, reparación y protección del acero así como la recuperación de la sección, se realizará conforme a lo descrito anteriormente.

Referencias

Puertos de México . Guaymas Sonora. Administración Portuaria Integral de Guaymas, S A de C V Página Web <http://www.puertodeguaymas.com/index1.asp> API Guaymas. Consultada en Octubre de 2006.

API Guaymas. Acta administrativa de reconocimiento y detección de requerimientos de mantenimiento, fechada 21 de febrero de 2006. Guaymas, Son.

Dirección API Guaymas. Carta solicitud del Director General Lic José Luis Iberri Martínez, con fecha 22 de mayo de 2006. Guaymas, Son.

Gere, James M; Timoshenko, Stephen P. *Mecánica de materiales*. 2ª Edi. Grupo Editorial Iberoamérica. 1986. México.

Hannah, R L; Reed, S E *Strain gage Users' handbook*, Elsevier Applied Science, London and New York Society for Experimental Mechanics, Inc 1992.

Fabela Gallegos, Manuel de Jesús; Vázquez Vega, David; Hernández Jiménez, José Ricardo. "La extensometría como técnica de medición experimental". Artículo 3, Boletín IMT Notas No 92, Febrero 2005. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro.

ACI Standard. *Building code requirements for structural concrete* (ACI 318-95), Section 8.5. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI. USA.

Mindess, S; Young, J F *Concrete*. Prentice-Hall, Inc Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 1981. pag. 400.

Del Valle Moreno, Angélica. *Primer Informe Parcial de Investigación del Estudio EE 07/06: Determinación del estado de corrosión y capacidad de carga de los muelles de los tramos 2, 3, 4, 5 y 6 del Puerto de Guaymas, Son.* +Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro 2006.

CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671



**INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE**



www.imt.mx
publicaciones@imt.mx