

Avaliação da capacidade de carga da estrutura de um cais corroído no Golfo do México

M. Martínez-Madrid*¹ , A. A. Torres-Acosta¹ , S. Aschermann², B. Commander², J. Grimson²,
P. Castro-Borges³ 

* Autor de Contato: martinez@imt.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.323>

Recepção: 15/06/2018 | Aceitação: 16/08/2018 | Publicação: 31/08/2018

RESUMO

Uma prova de carga e análise de classificação em um cais danificado pela corrosão no Golfo do México foi realizado para avaliar sua integridade estrutural. Os procedimentos incluíram instrumentação para aplicação de carga de quatro cargas diferentes (50, 60, 350 e 700 t) para examinar seu desempenho estrutural, calibrar os modelos de elementos finitos resultantes da estrutura e, finalmente, estimar os fatores de classificação de carga usando a metodologia AASHTO. Os resultados mostraram que os danos causados pela corrosão não representaram uma ameaça estrutural extrema; no entanto, constatou-se que os elementos estruturais de vários pilares estão atualmente sobrecarregados e precisam ser reforçados externamente. Este documento descreve os procedimentos de ensaio, de análise dos resultados e os critérios de gerenciamento de dados.

Palavras-chave: capacidade de carga; taxa estrutural; dano de corrosão.

Citar como: M. Martínez-Madrid, A. A. Torres-Acosta, S. Aschermann, B. Commander, J. Grimson, P. Castro-Borges (2018), “Avaliação da capacidade de carga da estrutura de um cais corroído no Golfo do México”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 347-362, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.323>

¹ Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Km. 12 Carretera Querétaro - Galindo, Sanfandila, Querétaro, México

² Bridge Diagnostic Inc., 1995 57th Court North Suite 100, Boulder CO 80301-2810, Estados Unidos.

³ CINVESTAV, Unidad Mérida, Km 6 Carretera Antigua a Progreso, Cordemex, Mérida, Yucatán, México.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo: No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2019.

Load rating assessment of a corroded pier structure in the Gulf of Mexico

ABSTRACT

This original work assesses the structural integrity of a pier located in the Gulf of Mexico through a live-load testing analysis of a corroded structure that withstands heavy loads. Procedures included instrumentation for load application of four different loads (50, 60, 350, and 700 Ton) to examine its structural performance, then calibrate the resultant finite-element models of the structure, and finally estimate the load rating factors using AASHTO methodology. Results showed that corrosion damages did not appear to represent an extreme structural menace; however, it was found that several piers' structural elements are currently overloaded and need to be externally reinforced. This paper outlines the testing procedures, describing both the followed analysis and the data management criteria.

Keywords: load capacity; structural rate; corrosion-damage.

Evaluación de la capacidad de la carga de la estructura de un muelle corroído en el Golfo de México

RESUMEN

Se realizó una prueba de carga viva y un análisis de calificación en un muelle dañado por la corrosión en el Golfo de México para evaluar su integridad estructural. Los procedimientos incluyeron instrumentación para la aplicación de carga de cuatro cargas diferentes (50, 60, 350 y 700 Toneladas) para examinar su rendimiento estructural, luego calibrar los modelos de elementos finitos resultantes de la estructura y finalmente estimar los factores de clasificación de carga utilizando la metodología AASHTO. Los resultados mostraron que los daños por corrosión no representaron una amenaza estructural extrema; sin embargo, se descubrió que los elementos estructurales de varios pilares actualmente están sobrecargados y necesitan ser reforzados externamente. Se describen los procedimientos de prueba, el análisis y el manejo de datos.

Palabras clave: capacidad de carga; tasa estructural; daño por corrosión.

1. INTRODUÇÃO

É bem sabido que a corrosão da armadura representa um enorme e caro problema a ser resolvido em estruturas marinhas, mas um investimento preventivo é obrigatório para preservá-los (Schmitt Günter, 2009), (Hays).

Estruturas de concreto que são expostas à água do oceano são comumente suscetíveis à corrosão. Quando sais e produtos químicos se difundem através do concreto, geralmente promovem a formação de fissuras devido às forças expansivas da camada de óxido da armadura. Além disso, as fissuras formadas, juntamente com umidade e sais podem permear para a armadura mais rapidamente e, em seguida, novamente, causar danos prematuros devido à corrosão (NASA Kennedy Space Center).

Mesmo que a fissuração seja a reação concreta mais visível após o início da corrosão, ela está relacionada a outros danos, como deterioração estrutural, perda de rigidez à flexão e capacidade de carga. Além disso, os produtos de corrosão enfraquecem a ligação entre o concreto e armadura, afetando ainda mais as propriedades mecânicas das estruturas danificadas, resultando em uma diminuição em sua integridade estrutural original.

A maioria dos cais no México mostra um grau de corrosão, conforme declarado em um relatório de inspeção de 100% (Torres Acosta, 2012). O Instituto de Transporte do México (IMT) junto com a Bridge Diagnostics, Inc. (BDI) estabeleceu um procedimento original para fazer uma

avaliação do dano causado pela corrosão do cais para estabelecer se os pilares corroídos ainda são adequados para o uso originalmente projetado. Isso deveria ser aplicado como um sinal de diagnóstico para os importantes cais do México.

Um componente primário nesta avaliação é uma prova de carga para determinar se um cais, exibindo danos significativos à corrosão, ainda pode operar sem risco, suportando todas as suas cargas de serviço necessárias, incluindo guindastes e contêineres que estão atualmente presentes durante o procedimento de carregamento normal, condições de serviço. Isso é feito avaliando o desempenho estrutural por meio de uma série de provas de carga controladas e, em seguida, desenvolvendo os modelos apropriados verificados em campo a partir dos quais o cais é classificado com carga usando as especificações AASHTO LRFD (AASHTO, 2002).

Como o termo implica, o diagnóstico de prova de carga em um processo não destrutivo que pode determinar o desempenho de uma estrutura sob condições normais de carga. Para pontes e pilares, o carregamento é geralmente realizado pela condução de veículos (caminhões ou guindastes) com pesos de eixo medidos ao longo dos caminhos prescritos. A localização do veículo deve ser monitorada juntamente com todas as medições dos vários sensores conectados.

Após a conclusão das provas de carga, os valores medidos são usados para verificar e calibrar as respostas teóricas geradas por um modelo de software representativo. Para que o processo trabalhe no modelo. Deve ter características realísticas de geometria e rigidez. Isso é feito essencialmente reproduzindo todo o procedimento de ensaio de carga com um modelo de análise de elementos finitos (FEA); isso inclui gerar um modelo bidimensional ou tridimensional da estrutura (depende da complexidade da estrutura), aplicar sensores virtuais no modelo e aplicar cenários de carga idênticos que foram utilizados durante os procedimentos de ensaio de carga no campo. Por ter uma representação geométrica precisa e reproduzir o ensaio de carga, uma comparação direta entre o campo e as respostas analíticas pode ser feita.

Uma vez que um modelo representativo é obtido, o projeto requerido ou as cargas de classificação podem ser aplicados e as classificações de carga podem ser calculadas para todos os componentes no modelo. Como as cargas aplicadas a cada elemento estrutural são geradas por uma representação realista de toda a estrutura, as cargas dos componentes são muito mais precisas. Outra vantagem do ensaio de carga de diagnóstico é determinar se uma seção que parece danificada ou significativamente corroída está realmente causando uma redistribuição do carregamento para outros componentes estruturais. Ainda assim, devido a danos por corrosão, a capacidade do componente pode ser significativamente prejudicada, causando um erro de cálculo da capacidade de carga reduzida para esse membro estrutural específico. Esta é uma distinção importante porque a estrutura pode realmente estar respondendo de maneira perfeitamente apropriada sob cargas típicas, como verificado pelos ensaios de campo, mas, na realidade, a capacidade de carga é significativamente menor devido à capacidade estrutural diminuída. Portanto, medidas estruturais podem não indicar que um membro é “fraco”, mesmo que pareça “danificado”. Essa lacuna entre inspeções visuais e resposta estrutural adequada conhecida é o que levou ao desenvolvimento da “Abordagem Integrada” que combina essencialmente as medições de campo, a inspeção visual e a modelagem analítica para reduzir a incerteza inerente a todas essas três ferramentas de avaliação.

Com relação à classificação de carga do componente, a mesma equação especificada pelo AASHTO - Manual para Avaliação de Condições de Pontes é aplicada em (1). Além disso, as condições críticas de carga são provavelmente diferentes daquelas aplicadas durante as provas de carga. Todos os carregamentos de veículos necessários são aplicados ao modelo de estrutura, incluindo todos os cenários necessários de múltiplas presenças e efeitos dinâmicos.

$$RF = \frac{C - \gamma_{DC}(DC) - \gamma_{DW}(DW) \pm \gamma_P(P)}{\gamma_L(LL + IM)} \quad (1)$$

Onde:

RF = Fator de Classificação para membro individual.

C = Capacidade do Membro.

γ_{DC} = fator de carga LRFD para componentes estruturais e acessórios.

DC = efeito de carga morta devido a componentes estruturais.

γ_{DW} = fator de carga LRFD para superfícies desgastadas e utilitários.

DW = Efeito de carga morta devido ao desgaste da superfície e utilidades.

γ_P = fator de carga LRFD para cargas permanentes que não cargas mortas = 1,0

P = Cargas permanentes que não cargas mortas.

LL = efeito de carga ao vivo.

IM = efeito de impacto, seja AASHTO ou medido

2. METODOLOGIA

2.1 Procedimentos de Ensaios Estruturais

2.1.1 Processo de Instrumentação

O cais ensaiado era uma estrutura de concreto armado (R / C) que foi projetada para transportar cargas importantes, incluindo um guindaste de pórtico, cargas veiculares e de contêineres da carga e descarga de navios porta-contêineres. Sua superestrutura é composta de 11 vigas longitudinais em vigas transversais em T invertidas e uma plataforma de concreto contínuo de 5 vãos, sem superfície aparente indicada nos planos da Fig. 1. O comprimento total do píer/cais é de 250 m, composto por 25 vãos de 10 m, e sua largura é de 20,8 m, dividida em 7 vigas interiores espaçadas de 2 m no centro, 2 vigas principais sob os trilhos dos guindastes de pórtico e 2 pequenas vigas laterais de fâscia.

Em geral, o píer/cais apresentava diferentes graus de degradação estrutural, mostrando sinais de corrosão do aço principalmente evidenciados por grandes áreas de fragmentação. Havia algumas rachaduras visíveis nas longarinas, vigas do piso e no topo da laje. A sobrecarga era evidente pelo esmagamento das formas de convés pré-fabricadas de permanência no local adjacentes às longarinas. A Figura 2 mostra os resultados da pesquisa de danos no píer entre as vigas do piso 38 e 47, obtidos antes do píer ser instrumentado. As tabelas 1 e 2 mostram algumas das manifestações patológicas típicas de degradação observadas a partir da pesquisa de danos realizada no cais.

Dois áreas do píer/cais (entre as vigas de piso 38 e 47 foram instrumentadas e testadas quanto à carga: uma área com degradação mínima, definida como “saudável” (entre vigas de chão 38 e 40, Tabela 1) e outra com grande quantidade de degradação. Ambas as seções foram instrumentadas com 44 transdutores de tensão, 8 transdutores de deslocamento e 7 transdutores de rotação (Fig. 1). Vigas principais e vigas em T invertidas para fornecer tensões superficiais médias sobre o concreto armado.

Os transdutores de tensão e os medidores de inclinação foram afixados aos membros estruturais usando um adesivo de fixação rápida e guias de montagens removíveis, ou “pés”. Os sensores foram instalados e uma vez que o ensaio foi concluído, eles foram removidos. Sensores de deslocamento tipo cantiléver foram anexados à estrutura, instalando duas âncoras em ¼ de cunha e aparafusando os sensores às âncoras.

2.1.2 Prova de Carga

O píer/cais passou por várias provas de carga, que incluíam várias posições de caminhões transversais, um movimento de guindaste de pórtico e um movimento de guindaste Gottwald mais uma palheta de carga do guindaste. Figura 3. Marcadores fixos foram colocados no convés para determinar onde veículos cruzados, então, desta forma, futuras comparações de análises poderiam ser feitas com o veículo de carga nos mesmos locais que estavam no campo. Um "zero" ou ponto de referência inicial foi selecionado para que todas as outras medições no deck pudessem ser relacionadas a ele. Uma vez que o local de referência zero era conhecido, os caminhos de carga lateral para o veículo foram determinados. Normalmente, pelo menos duas passagens foram feitas em cada posição "Y" para garantir a reprodutibilidade dos dados.

O primeiro foi uma série de ensaios de carga semi-estática, consistindo de um caminhão contêiner carregado sobre os vãos instrumentados em 6 posições laterais diferentes. Todos os ensaios foram gravados continuamente a uma taxa de amostragem mínima de 33,33 Hz. Os ensaios de carga foram realizados em velocidade de rastreamento (4-8 km / h) para minimizar os efeitos dinâmicos.

O segundo conjunto de ensaios consistiu em laminar um dos grandes guindastes de pórtico sobre os palanques instrumentados. Semelhante aos ensaios de caminhão, as medidas e a posição do guindaste foram registradas continuamente a uma taxa de amostragem mínima de 33,33 Hz. O guindaste de pórtico de trilho para testar 700tons ponderados (43,75 toneladas por eixo com uma separação de suporte de 15,24 m).

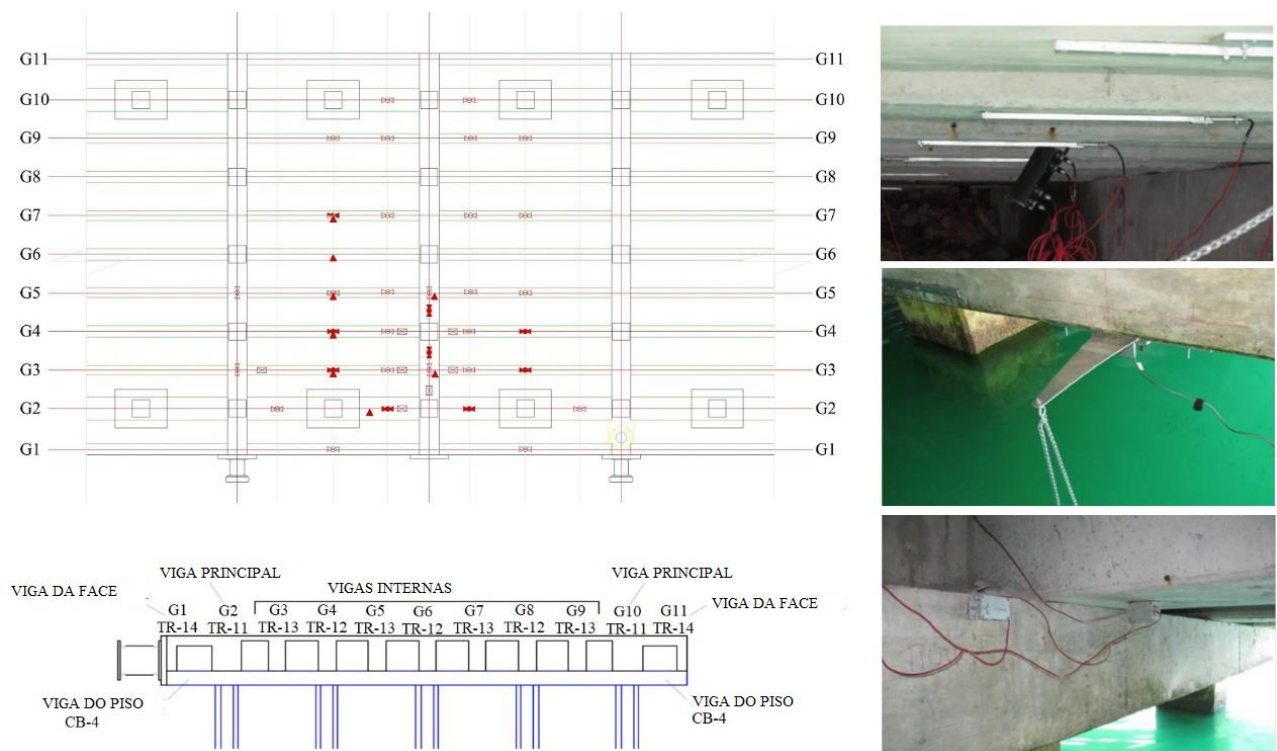


Figura 1. Plano geral de instrumentação com locais de medição e seções transversais e designação de elemento estrutural. Foto de cima: strain gages Midspan; foto central: Sensor de deflexão; inferior: sensores de rotação Tiltmeter

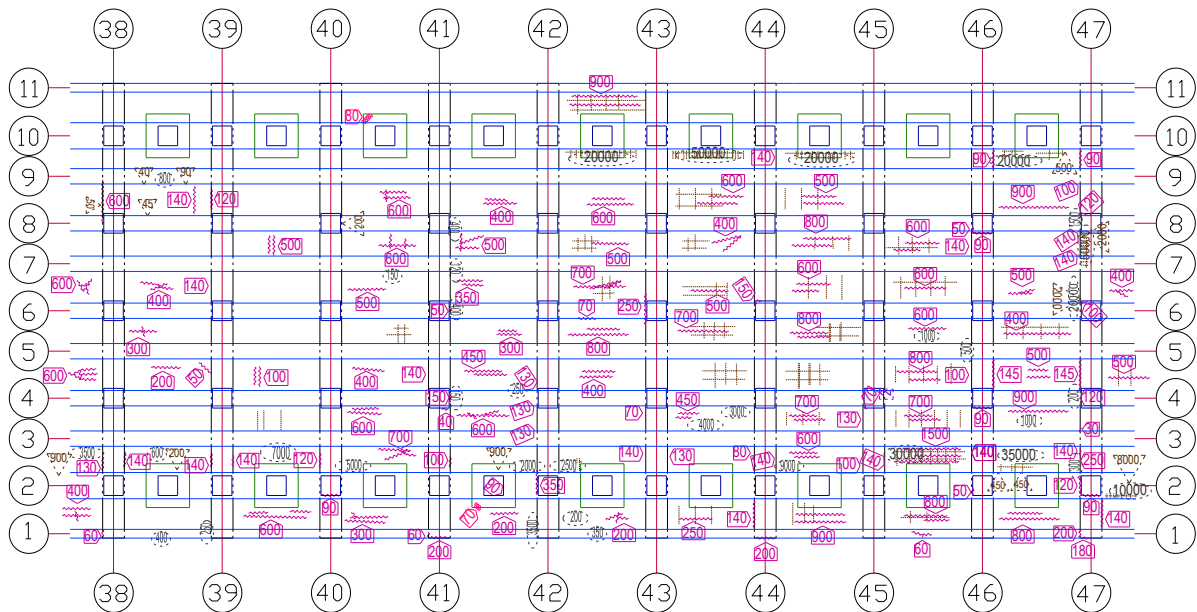


Figura 2. Levantamento de dano do cais entre as vigas do piso 38 e 47. A seção “saúdável” foi definida como a área docais entre vigas do piso 38 e 40. A seção “danificada” foi definida como a área do cais entre vigas 45 e 47.

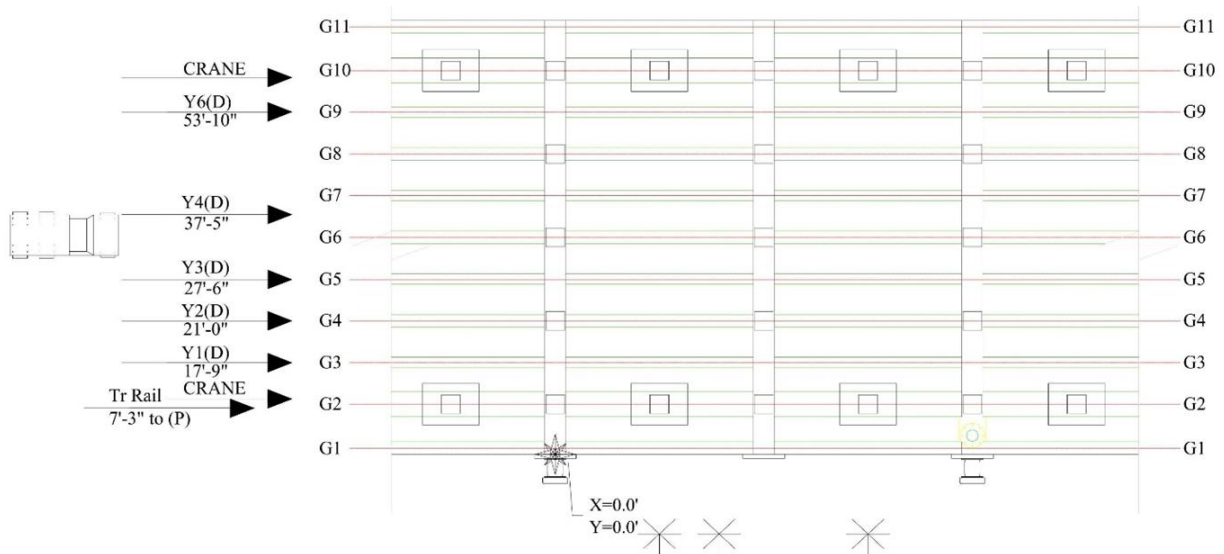


Figura 3. Plano geral de posição do caminhão e tipos de carga aplicados durante o ensaio (da esquerda para a direita, caminhão, pântano e guindastes Gottwald).

Na seção “saudável”, o peso do caminhão usado era de 48,18 t, distribuídas como 3,01 t no eixo 1 (com uma separação de rodas de 2,03 m), 11,67 t nos eixos 2 e 3 (com uma separação de rodas de 2,13 m) e 10,63 t nos eixos 4 e 5 (com uma separação de rodas de 2,13 m). A seção “danificada” foi testada com um caminhão de 39,70 t, distribuído como 3,13 t no eixo 1 (com uma separação de rodas de 2,06 m), 9,91 t nos eixos 2 e 3 (com uma separação de rodas de 2,18 m) e 8,13 t nos eixos 4 e 5 (com uma separação de rodas de 2,18 m). Idealmente, o mesmo caminhão e contêiner teria sido usado em ambos os ensaios, mas isso não era viável devido às operações portuárias normais.

O terceiro tipo de ensaio de carga foram os ensaios estáticos realizados usando o guindaste de pórtico, mas desta vez sem movimento. Para estes ensaios, o guindaste foi colocado de modo que o centro de seu carrinho oeste estivesse localizado na parte intermediária do primeiro vão instrumentado (12 e 19, respectivamente). Os dados foram gravados continuamente conforme o guindaste executava uma série de procedimentos típicos de carregamento / descarregamento: pegar um contêiner totalmente carregado, mover o contêiner até a extremidade mais distante da lança (sobre a água) e depois mover o contêiner de volta para o próximo terminal. dá lança, em seguida, deite o recipiente de volta ao chão Estes ensaios estáticos foram realizados para obter uma compreensão qualitativa das características de transferência de carga do guindaste durante o processo de carga e descarga.

O quarto e último conjunto de ensaios de carga foi um ensaio de carga dinâmica e um ensaio estático realizado com o menor e móvel guindaste Gottwald. Assim como nos outros ensaios de carga dinâmica, as medições dos sensores e a posição longitudinal do guindaste foram registradas continuamente a uma taxa de amostragem mínima de 33,33 Hz, conforme o guindaste foi movido ao longo dos vãos instrumentados em velocidade lenta. Devido a falhas e limitações do guindaste, apenas um ensaio foi realizado ao longo de um caminho, e apenas na seção “danificada” do píer. O ensaio estático consistia em registrar os dados quando o guindaste estendia os estabilizadores, abaixava os estabilizadores, levantava-se totalmente do chão, abaixava-se e retraía os estabilizadores. A grua da Gottwald pesava 360 t, distribuída igualmente nos seus eixos com 60 t em cada uma (com uma separação de suporte de 4,65 m).

Tabela 1. Levantamento de danos na seção "saudável" do cais.













| Vigas do Piso 38-39 | |
|---|---|
| Viga do Piso 38 Vista geral, Face Leste |  |
| Viga do Piso 39 Vista geral, Face Oeste |    |
| | Pequenas fissuras entre G8-G9. Pequena delaminação sob G1 |
| Pilar 1, Viga do Piso 38 Face Leste |   |

Tabela 2. Levantamento de danos na seção "danificada" do cais.

| Vigas do Piso 46-47 | |
|--|--|
| Viga do Piso 46 Vista Geral, Vista Leste |  |
| Viga do Piso 46 Vista Geral, Vista Oeste |      <p>Detalhe viga 47, face Oeste, Entre G6-G7.</p> |

3. RESULTADOS

3.1 Investigação preliminar dos ensaios realizados

Todos os dados de campo foram examinados graficamente pela primeira vez para fornecer uma avaliação qualitativa da resposta de carga dinâmica da estrutura.

As respostas estruturais em função da posição de carga foram registradas a partir do indicador de posição do caminhão sem fio, fornecendo dados de tensão em função da posição de tensão.

Os resultados dos ensaios de cruzamentos de caminhão idênticos foram reprodutíveis, e todas as cepas pareciam ser lineares em relação à magnitude da carga (posição do caminhão) e a grande maioria das respostas retornou a zero, indicando que a estrutura estava atuando em seu regime elástico linear. Os resultados da deformação do caminhão podem ser vistos na Fig. 4, na qual o comportamento linear-elástico e a reprodutibilidade dos ensaios foram observados.

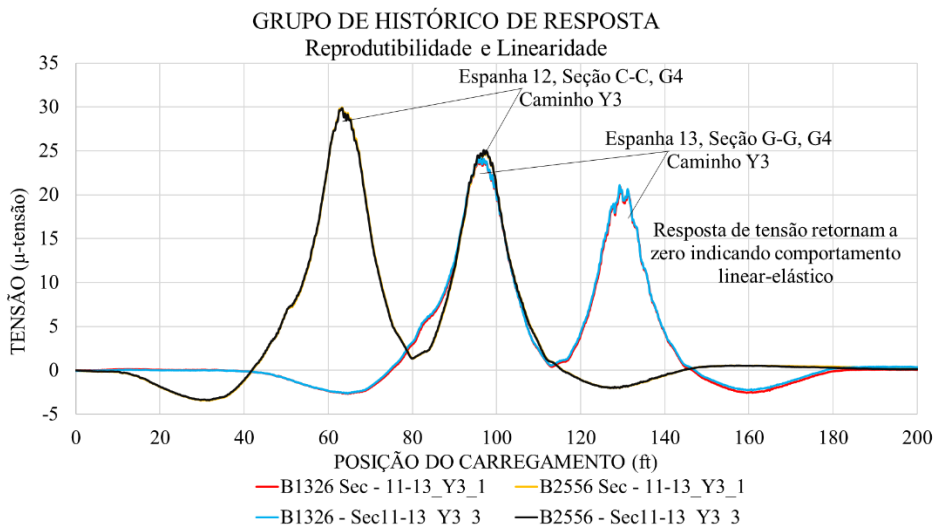


Figura 4. Comportamento linear e elástico e reprodutibilidade dos resultados de ensaio-deformações.

As magnitudes de resposta à deformação dos medidores midspan na seção “danificada” foram muito menos consistentes do que as magnitudes de tensão da seção “saudável”. Essas respostas foram razoavelmente esperadas devido ao nível mais alto de degradação observado na seção “danificada” versus a seção “saudável” do píer, e indicam que valores mais baixos de rigidez podem ser confirmados no modelo FE da seção “danificada”. A Figura 5 ilustra as magnitudes de tensão consistentes registradas na seção “saudável”, e a Figura 6 faz o mesmo para os resultados inconsistentes na seção “danificada”.

Medidas de deflexão máxima foram diretamente comparadas para a seção “saudável” e a seção “danificada”. Em geral, havia uma concordância entre as duas regiões e, muitas vezes, a seção “saudável” apresentava deflexões ligeiramente maiores (porque a carga aplicada à seção “saudável” era maior).

Uma comparação direta dos resultados de deslocamentos e de deformações foi feita para as respostas Truck and Gottwald Guindaste. O guindaste de Gottwald induziu respostas significativamente maiores nas vigas e traves de piso em comparação com o caminhão totalmente carregado. Isso é visto na Figura 7 para os valores de deslocamento do estribo e na Figura 8 para os valores de deformação de stringer. A distribuição da carga lateral dessa estrutura foi examinada examinando-se os valores de deslocamento e de deformação da flange inferior para todas as vigas para as posições de caminhões que geraram respostas midspan máximas. A distribuição lateral aparente foi muito baixa nos dois períodos.

Isso pode ser devido ao fato de que os membros estruturais de Gottwald são muito longos e absorvem a maior parte do carregamento, e também o convés provavelmente seria flexível devido às cargas pontuais extremamente longas sendo aplicadas pelos caminhões carregados de contêineres e pelo móvel móvel de Gottwald. guindaste. Durante o processo de ensaio de carga, observou-se que as formas de permanência no local (SIP) foram esmagadas mais severamente na face interna das vigas principais.

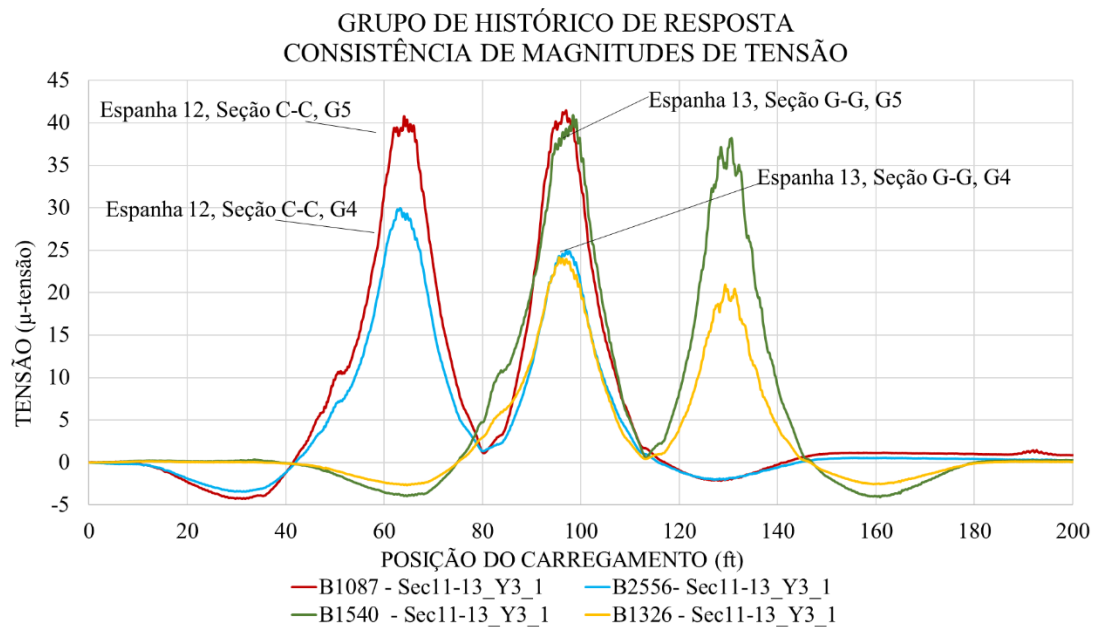


Figura 5. Magnitudes de tensão midspan consistentes registradas na seção "saudável".

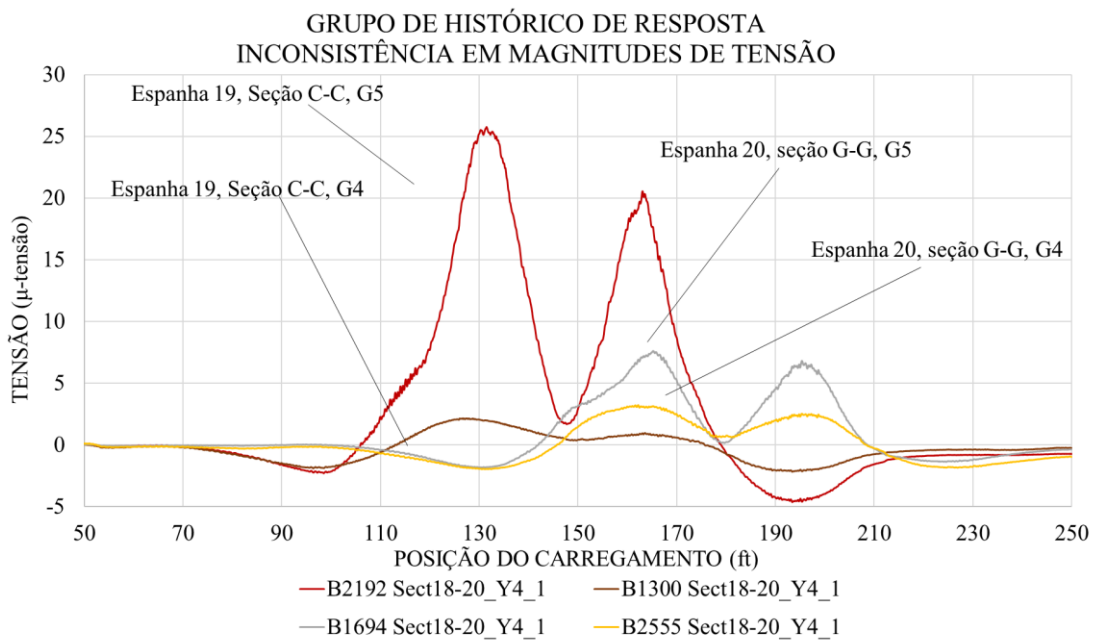


Figura 6. Magnitudes de tensão midspan inconsistentes registradas na seção "danificada".

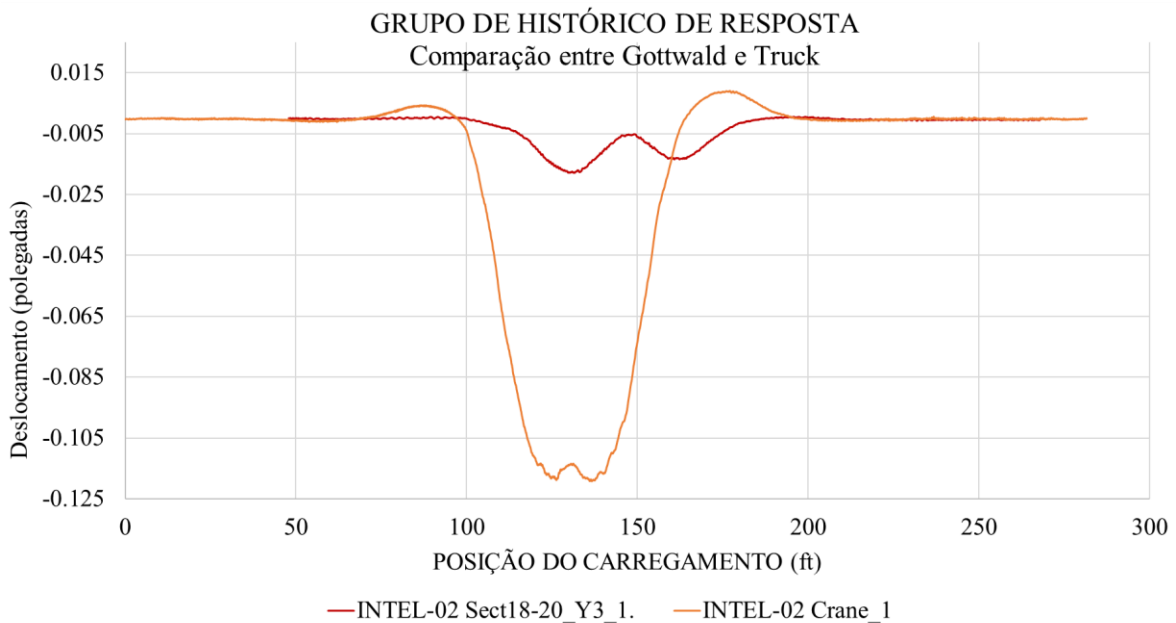


Figura 7. Deslocamento da longarina devido aos guindastes da Truck & Gottwald.

Isto pode ser devido ao fato dos trilhos do guindaste de pórtico serem deslocados para a face interna das vigas principais e ao fato de que os guindastes Gottwald carregam principalmente o convés e as amarras imediatamente adjacentes às vigas principais. Isso indicou que a laje nesses locais estava apenas transferindo carga em uma direção. Parecia que o carregamento do caminhão nas longarinas internas foi bastante transferido para as vigas principais, mas que a carga do guindaste não foi transferida para as longarinas internas como esperado. Este foi um fator importante no modelo. A distribuição da carga do guindaste para as longarinas interiores é ilustrada na Figura 9.

Como dito anteriormente, todos os dados de ensaio foram inicialmente processados e avaliados quanto à qualidade. Em seguida, um conjunto de dados de ensaio para cada caminho de caminhão foi selecionado por ter a melhor qualidade aparente. Esses dados selecionados foram então

usados para calibrar os modelos de elemento finito (FE) da estrutura, que por sua vez foram usados para produzir as classificações de carga.

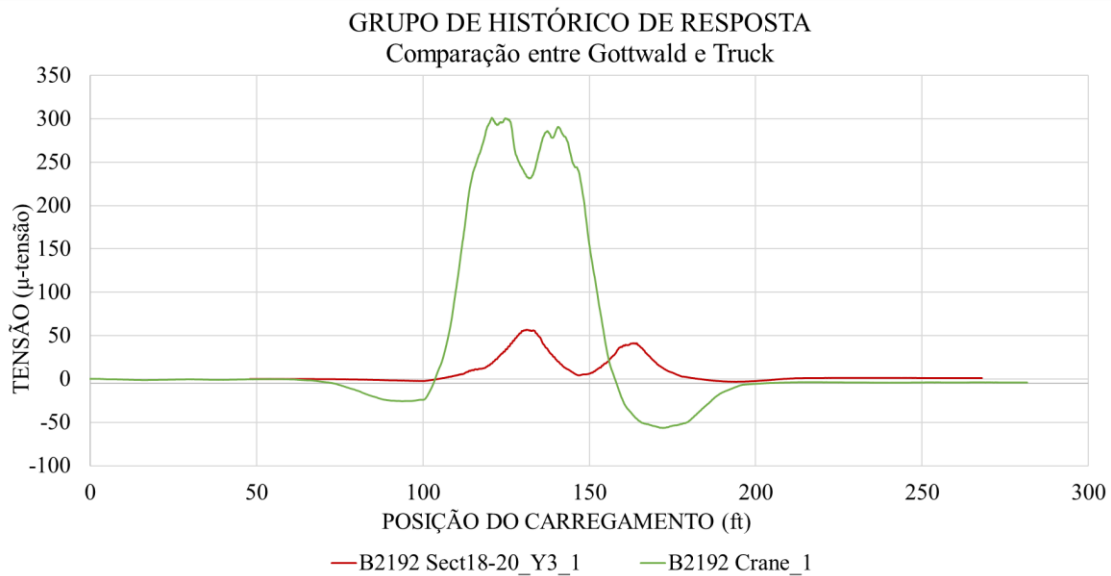


Figure 8. Tensão nas longarinas.

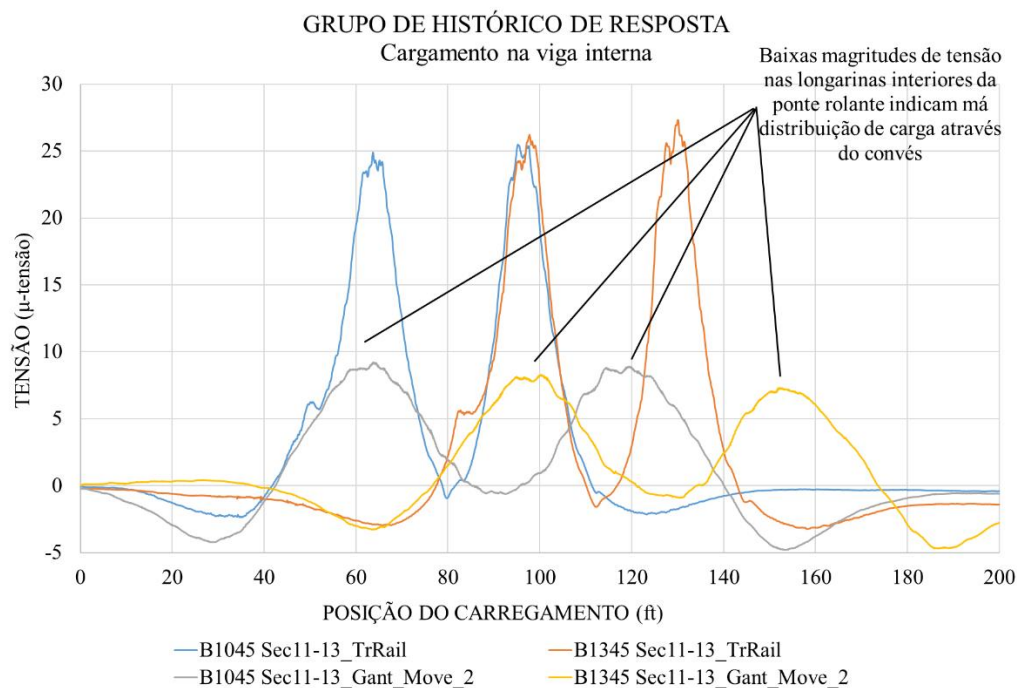


Figure 9. Distribuição da carga do guindaste para as longarinas internas.

3.2 Modelagem, Análises e Correlação entre Dados

As informações obtidas a partir da investigação preliminar dos resultados dos ensaios foram posteriormente utilizadas para verificar a precisão de um modelo de elementos finitos (Fig. 10). Os três métodos e achados dos procedimentos de modelagem de Elementos Finitos (FE) foram: Geração do Modelo de Elementos Finitos; Procedimentos de calibração do modelo e, finalmente, resultados de calibração do modelo.

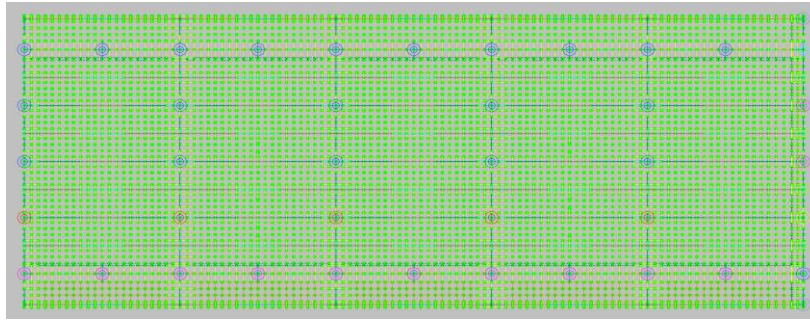


Figura 10. Modelo de elementos finitos da estrutura de cais avaliada.

Seguindo os procedimentos de otimização, o modelo “saudável” produziu um coeficiente de correlação médio de 0,9729, enquanto o modelo “danificado” produziu uma correlação média de 0,9704. Ambas as correlações podem ser consideradas como uma correspondência adequada para uma estrutura de R / C desse tipo. A Tabela 3 mostra os valores de precisão de parâmetros e modelos utilizados no modelo inicial e obtidos para os modelos finais. Esses valores foram determinados para estabelecer os iniciais como teóricos e os finais, ajustando-os aos resultados do modelo finito.

3.3 Resultados das Medidas de Carregamento

Uma vez que o modelo de elementos finitos foi calibrado para condições de campo, a análise de engenharia foi seguida para endereçar qualquer parâmetro otimizado que pudesse mudar com o tempo ou que pudesse não ser confiável com cargas pesadas ou danos adicionais. O Fator de Classificação de Carga foi determinado por uma fórmula baseada na capacidade de um determinado elemento, as cargas vivas e mortas aplicadas (e seus fatores correspondentes) e um efeito de impacto considerado. Sabe-se que um fator de classificação de carga maior que 1,0 indica que a capacidade de um membro excede as cargas aplicadas com os fatores desejados de segurança (AASHTO, 2002).

Um fator de classificação inferior a 1,0 indica que um membro estrutural é deficiente, de modo que um veículo ou carga específica não pode atravessar a ponte com o fator de segurança desejado. Um número próximo de 0.0 indica que a estrutura não pode carregar seu próprio peso morto e manter o fator de segurança desejado. O fator de classificação de componente mais baixo geralmente controla a classificação de carga de toda a estrutura. Como mencionado anteriormente, a equação de classificação especificada pelo AASHTO - Manual de Avaliação de Condições de Pontes foi aplicada (1).

3.3.1 Cálculos de capacidade

As capacidades de cisalhamento e momento foram calculadas para as longarinas R / C usando as Especificações de Projeto de Ponte AASHTO LRFD 5ª Edição - 2010 e os planos estruturais as-built fornecidos pela IMT. De acordo com os planos fornecidos, a força de rendimento da barra de reforço foi assumida como sendo de 4.200 kg / cm². A resistência à compressão do concreto foi estimada em 233 kg / cm² com base nos ensaios de compressão do cilindro realizados em amostras de concreto por IMT.

3.3.2 Procedimentos de classificação de carga

As classificações de carga foram realizadas no modelo calibrado de acordo com o método AASHTO LRFR. Os fatores de carga e resistência usados nos cálculos de classificação de carga são fornecidos na Tabela 4.

Várias combinações de veículos de carga também foram consideradas para classificação de carga. As combinações de carga foram baseadas em procedimentos operacionais normais e tentaram incluir outras combinações viáveis que podem ou não ser procedimentos operacionais “típicos”.

Havia 6 cenários específicos: um com o guindaste de pórtico sozinho, um com o guindaste de Gottwald por si só, um com o mesmo guindaste de Gottwald, mas estático, um com quatro caminhões de contêiner, um com o guindaste de pórtico e um caminhão, e o final um com o guindaste de pórtico e quatro caminhões.

3.3.3 Classificação dos carregamentos

A Tabela 5 mostra um resumo dos fatores de classificação de carga e respostas para os veículos de classificação de carga acima mencionados. Os fatores críticos de classificação de momento positivo ocorreram no midspan das vigas em T invertidas devido a uma quantidade insuficiente de aço de reforço com momento positivo. As classificações de momento negativo foram controladas nas extremidades dos perfis em T, mas ficaram um pouco abaixo de 1,0 para todas as classificações de inventário. As classificações críticas de cisalhamento foram controladas pela capacidade de suporte do flange das vigas em T invertidas para a falha do suspensor. O Fator de Classificação de Carga geral de controle para essa estrutura foi 0,20 produzido no momento positivo com o guindaste móvel Gottwald.

Tabela 3. Precisão do modelo e valores de parâmetros.

| Parâmetro de modelagem | Valor do modelo inicial | Valor do modelo final |
|--|---|---|
| Módulo Efetivo (E [kg/cm ²]) | | |
| - Deck | 225,000 | 35,150 |
| - Deck adjacente às vigas T | 225,000 | 17,580 |
| - Deck adjacente às vigas TR-11 | 225,000 | 17,580 / 0 |
| - TR-13 vigas em ½ | 225,000 | 81,275 / 60,960 |
| - TR-13 vigas à ¼ | 225,000 | 220,400 |
| - TR-13 inteiras | 225,000 | 43,940 |
| - TR-12 vigas em ½ | 225,000 | 142,510 / 106,870 |
| - TR-12 vigas à ¼ | 225,000 | 220,400 |
| - TR-12 inteiras | 225,000 | 70,300 |
| - TR-11 vigas em ½ | 225,000 | 101,900 |
| - TR-11 beams at ends | 225,000 | 109,700 |
| - T- vigas em ½ | 225,000 | 89,150 |
| - T- inteiras | 225,000 | 256,600 |
| Rigidez torcional Efetiva (J [cm ⁴]) | | |
| - Viga T invertida | 69,960,000 | 52,208,000 |
| Resistência Vertical nas vigas T, (Fz [kg/cm]) | | |
| - Molas interiores | 1,597,000 | 1,160,800 |
| - Molas intermediárias | 1,597,000 | 803,600 |
| - Molas externas | 1,196,500 | 1,303,700 |
| Parâmetros de Erro | Valor de modelo inicial, “Saudável/ Danificado” | Valor de modelo inicial, “Saudável/ Danificado” |
| Erro absoluto | 95,515 / 35,500 | 33,000 / 29,600 |
| Erro percentual | 36.7% / 13.0% | 5.6% / 12.1% |
| Erro de escala | 2.9% / 4.3% | 1.5% / 3.9% |
| Coefficiente médio de correlação | 0.8973 / 0.9133 | 0.9729 / 0.9704 |

4. DISCUSSÃO

Análises foram feitas para cargas críticas e sua resposta para o momento positivo, para o momento negativo e para o cisalhamento. A maioria dos valores resultantes da classificação de carga estava abaixo de 1,0, o que significa que as cargas excederam as capacidades dos elementos. O fator crítico de carga e respostas para o momento positivo foi de 0,20 produzido pelo guindaste móvel de Gottwald. Para o momento negativo, a combinação do guindaste de pórtico com quatro caminhões de contêineres foi crítica com um fator de 0,94. O fator de classificação de carga crítica e as respostas de cisalhamento foram 0,50 com o guindaste de Gottwald, novamente, mas estático.

Em relação às deflexões, no geral, não houve muitas diferenças entre as seções “saudável” e “danificada”. Essas duas seções foram instrumentadas de forma idêntica e mostraram resultados ligeiramente diferentes, com uma deflexão de $-4,55 \times 10^{-2}$ cm na seção “danificada”.

Tabela 4. Fatores de carga e resistência aplicados.

| Método de Avaliação | Descrição | Tipo de carregamento | Fator |
|----------------------------------|--------------------------|----------------------------|-------|
| AASHTO LRFR (Inventário) | Carga Morta - Estrutural | Todos os veículos | 1.25 |
| | Carga Viva | Gantry Guindaste (Design) | 1.75 |
| | | Gottwald Guindaste (Legal) | 1.40 |
| | | Trucks (Design) | 1.75 |
| | Fator de impacto | Gantry Guindaste (Design) | 5% |
| | | Gottwald Guindaste (Legal) | 5% |
| Trucks (Design) | | 33% | |
| AASHTO LRFR (Operando) | Carga Morta - Estrutural | All Vehicles | 1.25 |
| | Carga Viva | Gantry Guindaste (Design) | 1.35 |
| | | Gottwald Guindaste (Legal) | 1.40 |
| | | Trucks (Design) | 1.35 |
| | | Gantry Guindaste (Design) | 5% |
| | | Gottwald Guindaste (Legal) | 5% |
| Trucks (Design) | | 33% | |
| AASHTO Fatores de Resistência | momento | N/A | 0.90 |
| | Cortante | N/A | 0.90 |

Tabela 5. Fatores e pesos críticos de classificação de carga LRFR para cinco configurações de carga.

| Veículo de Classificação | Resposta, localização | LRFR – Inventário | | LRFR – Operando | |
|---------------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| | | RF | t | RF | t |
| Gantry Guindaste | + Momento, TR – 11 | 0.86 | 399 (um lado) | 1.11 | 515 (um lado) |
| Gottwald Guindaste | + Momento, Viga T | 0.20 | 72 (bruto) | 0.20 | 72 (bruto) |
| Gottwald Guindaste Estático | Shear, Viga T | 0.50 | 180 (bruto) | 0.20 | 72 (bruto) |
| Caminhão Container | + Momento, Viga T | 0.55 | 12.8 (eixo duplo) | 0.71 | 16.6 (eixo duplo) |
| Caminhão Container + Gantry Guindaste | + Momento, Viga T | 0.49 | N/A | 0.64 | N/A |

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de prova de carga indicaram que o píer/cais estava funcionando de maneira linear-elástica, apesar de inconsistências nas magnitudes de resposta terem sido observadas na seção “danificada”. Muitas das vigas estruturais, especialmente as vigas T invertidas laterais, mostraram sinais de fragmentação de concreto bastante severa devido a uma expansão do aço de reforço (corroído). No entanto, esta é principalmente uma questão de manutenção e não tem um efeito importante na capacidade estrutural das seções até que haja perda significativa de aço devido à corrosão. Poderia ser assim possível que as grandes cargas aplicadas gerassem rachaduras por deformação, o que levaria a uma maior exposição do aço reforçado a íons corrosivos. Uma correlação saudável foi obtida pela análise após o processo de calibração, indicando ainda que todas as respostas estruturais eram lineares.

O fator crítico de classificação para este píer foi de 0,20 obtido com o guindaste móvel de Gottwald e foi controlado pelo momento positivo nas vigas em T invertidas transversais. É importante notar que a baixa classificação de carga se deve ao insuficiente momento positivo de reforço de aço no flange inferior das vigas em T invertidas. A avaliação não-destrutiva (NDE) deve ser realizada nas vigas em T invertidas para localizar e determinar a quantidade de aço que ainda permanece presente.

Vários outros componentes estruturais também apresentavam fatores de classificação inferiores a 1,0 para o guindaste móvel Gottwald. De fato, a capacidade de suporte de flange dos feixes de T invertidos produziu apenas fatores de classificação ligeiramente melhores a 0,50, e a capacidade de midspan momento dos feixes de TR-13 foi de apenas 0,75. Como consequência, considerações técnicas cuidadosas devem ser seguidas, uma vez que estes resultados sugerem que a remoção do guindaste das operações normais deve ser considerada até que os membros deficientes ou danificados sejam suficientemente fortalecidos (para aumentar sua capacidade de carga). O fortalecimento de todos os membros insuficientes pode ser uma opção viável, uma vez que os componentes fracos estão relativamente isolados; no entanto, ainda é recomendado que a EQM seja realizada primeiro para verificar se as capacidades usadas para classificação de carga estavam de fato corretas com base no aço atual presente nos membros. No mínimo, devem ser tomadas medidas para que o guindaste de Gottwald nunca seja colocado dentro de uma extensão do guindaste de pórtico.

As futuras inspeções devem focar a escalada das fissuras de momento nas vigas em T invertidas transversais e nas longarinas. Além disso, deve-se prestar muita atenção às áreas de apoio de flange das vigas em T invertidas e aos sinais de falha associados às bordas dos feixes.

Os fatores de classificação de carga e as conclusões apresentadas neste relatório são fornecidos como recomendações com base no comportamento e na condição de resposta da estrutura no momento do ensaio de carga. Degradação estrutural adicional deve ser considerada em avaliações de carga futuras.

6. AGRADECIMENTOS

Esta investigação foi financiada pelo Instituto Mexicano del Transporte. A ajuda de M. Balancan-Zapata durante a pesquisa de danos e o ensaio de carga na estrutura do píer também é reconhecida. As conclusões e opiniões desta publicação são de responsabilidade dos autores e não necessariamente das organizações patrocinadoras.

7. REFERENCIAS

Torres Acosta, A. A., Castro Borges, P., Martínez Madrid, M. (2008), “*Reporte final del Proyecto núm. EE 04/08: Inspección y evaluación por durabilidad de los muelles 6 y 7 de la*

terminal remota de la API Progreso”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, diciembre.

Günter, S., Schütze, M., Hays, G. F., Burns, W., Han, En-H., Pourbaix, A., Jacobson, G. (2009), "*Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control*," World Corrosion Organization, Worldwide rights reserved.

Hays, G. F., "*Now is the Time*," World Corrosion Organization, <http://www.corrosion.org/>

Kennedy Space Center, *Corrosion Technology Laboratory*, NASA Privacy Statement, Disclaimer, and Accessibility Certification, Florida. (<http://corrosion.ksc.nasa.gov/corrincon.htm>)

Broomfield, J. P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*.

Torres Acosta, A. A. (2012). "*Project No. EE 05/12 Informe Final: Inspección Preliminar de la Infraestructura del Muelle en 13 Puertos Federales Mexicanos*" Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, May.

AASHTO (2002) "*AASHTO Manual for the Condition Evaluation of Bridges*" American Association of State Highway and Transportation Officials.

Bridge Diagnostics, Inc. (2012). *Integrated approach to Load Testing*, Bridge Diagnostics, Inc.