

Uma análise das Falhas Estruturais em Obras de Arte Especiais

José Afonso Pereira Vitório¹

¹Universidade de Pernambuco / Vitório & Melo Ltda / afonsovitorio@gmail.com

Resumo

As Obras de Arte Especiais (OAEs) do sistema rodoviário brasileiro significam um patrimônio construído de valor inestimável pela importância que representam para o desenvolvimento econômico e social do país. Isso se torna mais evidente pelo fato de no Brasil o modal rodoviário ser o mais utilizado para o transporte de pessoas e de mercadorias, se comparado aos outros modais. Fica claro, portanto, que tais obras de infraestrutura necessitam das mais adequadas condições de segurança e funcionalidade para garantir a incolumidade dos usuários que por elas transitam e evitar os acidentes estruturais que têm acontecido com certa frequência, causando graves danos e colapsos em pontes, viadutos e passarelas de rodovias federais, estaduais e municipais.

É nesse contexto que este artigo faz uma análise, mesmo simplificada, das principais falhas estruturais que podem ocorrer em OAEs, abordando os aspectos conceituais e também casos reais de colapsos parciais ou totais acontecidos em função dessas falhas.

A parte inicial do estudo apresenta os conceitos de redundância estrutural e de zonas vulneráveis das OAEs, com os modos de falhas mais frequentes, conforme as diversas tipologias do tabuleiro, da mesoestrutura e da infraestrutura com base na diretriz europeia COST ACTION TU 1406. A parte referente aos casos práticos apresenta e comenta alguns exemplos de graves danos e de colapsos estruturais ocorridos em pontes, viadutos e passarelas, relacionando-os aos conceitos inicialmente apresentados.

Na parte final do texto são feitas considerações sobre o tema abordado, incluindo recomendações para a melhoria do desempenho e da vida útil das OAEs das rodovias brasileiras, no que se refere à qualidade dos projetos das obras novas, e à definição de critérios mais consistentes para manutenções preventivas periódicas que possam evitar os danos e acidentes estruturais que, além dos riscos iminentes aos usuários, têm causado grandes prejuízos sociais e econômicos ao país.

Palavras-chave

Colapso; estruturas; manutenção; pontes; redundância.

Introdução

O ciclo de vida de uma Obra de Arte Especial compreende as três fases seguintes: projeto, construção e utilização. A adoção de procedimentos corretos nessas fases é determinante para a garantia da segurança estrutural, da funcionalidade e da durabilidade das pontes, viadutos e passarelas; por outro lado, procedimentos inadequados e omissões podem gerar falhas responsáveis por graves danos, e até mesmo pelo colapso dessas obras.

Conceitualmente, falha estrutural é a perda de capacidade de um componente, ou de toda a estrutura, de suportar os carregamentos atuantes. Pode ser definida como falha frágil (associada à fratura) e falha dúctil (associada ao escoamento). Considerando que as estruturas são constituídas por diversos componentes e sistemas, é possível ocorrer uma das duas condições descritas a seguir.

Uma primeira condição, na qual a falha de um elemento não significa necessariamente falha da estrutura; trata-se dos sistemas em paralelo ou redundantes, que têm reserva de resistência e permitem a redistribuição de esforços. Esses sistemas são representados pelas estruturas hiperestáticas, nas quais o colapso global só ocorre quando um número suficiente de elementos falha. Esse número é o grau de hiperestaticidade mais um ($G_h + 1$).

Uma segunda condição, na qual a falha de um componente resulta na falha da estrutura. É o caso dos sistemas em série, ou não redundantes, representados pelas estruturas isostáticas, nas quais a confiabilidade do sistema é medida pela confiabilidade do elemento mais frágil (a estrutura entra em colapso quando se esgota a capacidade resistente da seção mais solicitada).

Os dois sistemas estão exemplificados nas figuras 1 e 2. A figura 1 mostra uma ponte redundante, com sistema estrutural constituído por um tabuleiro por múltiplas vigas contínuas monoliticamente ligadas às lajes e transversinas. A hiperstaticidade do sistema permite que caso aconteça falha em uma viga, por exemplo, haja redistribuição de esforços para as outras vigas, evitando a falha de toda a estrutura. A figura 2 mostra um exemplo de ponte com sistema não redundante. Trata-se de ponte com tabuleiro em treliça isostática, que pode colapsar em situações de falha frágil de uma das barras quando submetida a grandes esforços de tração ou compressão.

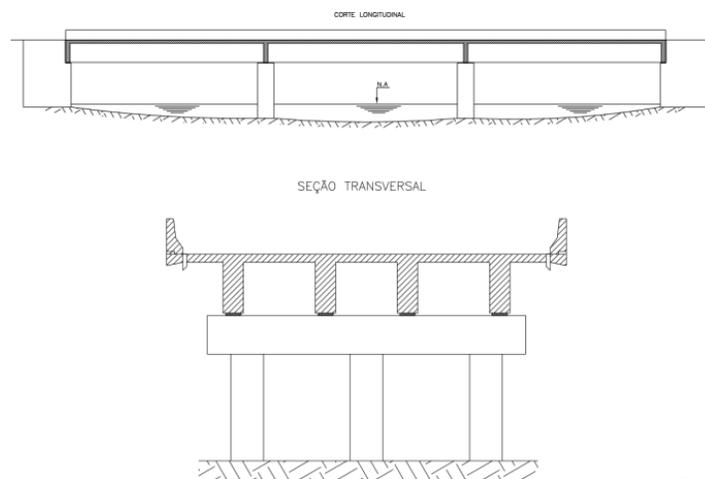


Figura 1 - Exemplo de ponte com estrutura redundante. (VITÓRIO, 2019).

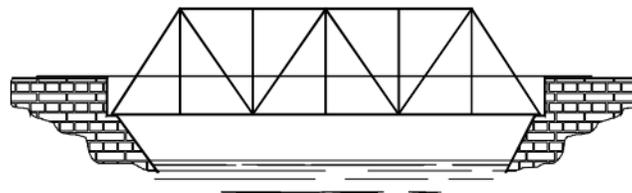


Figura 2 - Exemplo de ponte com estrutura não redundante. (DNIT, 2004).

Principais causas das falhas estruturais em Obras de Arte Especiais

A observação, o diagnóstico e a correção de falhas estruturais nas OAE's, constituem um processo que envolve uma rigorosa análise das causas das anomalias que, mesmo tendo origens diversas, estão geralmente associadas às três fases citadas na introdução deste trabalho.

Nas pontes, viadutos e passarelas das rodovias brasileiras, as falhas estruturais estão geralmente associadas às seguintes causas:

- Erros na fase de projeto;
- Erros na fase construtiva;
- Erosão nas fundações;
- Corrosão atmosférica;
- Cargas não previstas;

- Uso inadequado;
- Ações excepcionais;

De modo geral as falhas podem afetar qualquer parte da estrutura, mas nem todas as partes têm a mesma importância quanto às consequências de um dano estrutural. Existem regiões que são mais vulneráveis e por isso devem receber uma atenção especial, seja na superestrutura, na mesoestrutura ou na infraestrutura. Essas regiões são conhecidas como zonas vulneráveis, que têm maior propensão para a ocorrência dos modos de falhas com grandes impactos na segurança e na manutenção.

A seguir é apresentada uma síntese dos conceitos relacionados às zonas vulneráveis de Obras de Arte Especiais típicas, conforme a diretriz europeia COST ACTION TU1406, que estabelece um plano de controle e classificações de qualidade para pontes rodoviárias, integrando o conhecimento mais recente sobre procedimentos de avaliação de desempenho com a adoção de metas específicas, com vistas à futura normalização em nível europeu.

Zonas vulneráveis e modos de falha na superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura

Na superestrutura, as zonas vulneráveis nos tabuleiros em vigas estão geralmente relacionadas aos modos de falhas de flexão e cisalhamento, conforme a figura 3 que mostra os locais dessas regiões e as convenções adotadas para os modos de falha. A figura também mostra que se tratam de sistemas estruturais representativos das pontes típicas de concreto, destacando-se pontes com um único vão simplesmente apoiado, pontes de vãos múltiplos em vigas isostáticas, em vigas Gerber, em vigas contínuas e pontes integrais.

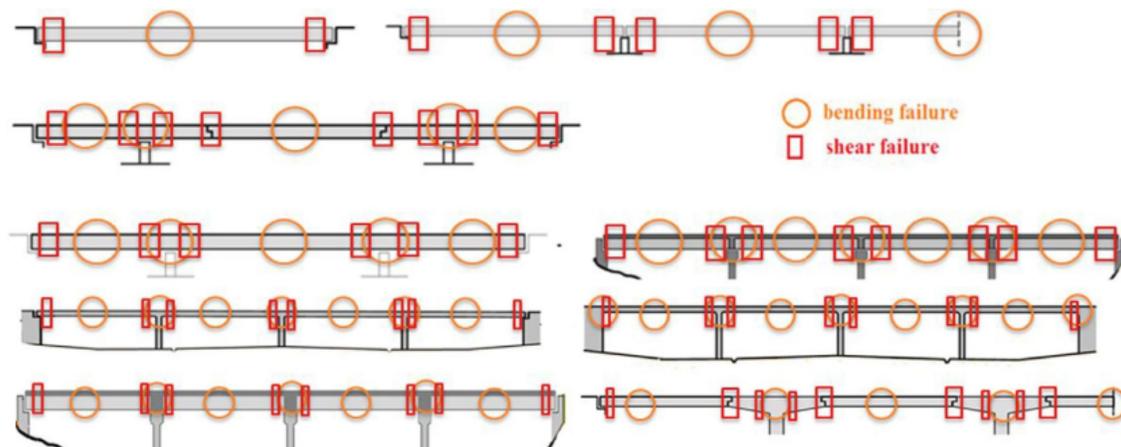


Figura 3 – Localização das zonas vulneráveis de flexão e cisalhamento na superestrutura das diversas tipologias das pontes em vigas. (COST ACTION TU1406, 2018).

Na mesoestrutura as zonas vulneráveis estão localizadas em elementos estruturais como pilares, encontros e aparelhos de apoio e estão associadas aos modos de falha de cisalhamento e flexão, acompanhados de compressão e também de flambagem. Evidentemente, tais elementos, por estarem sempre expostos a altas tensões e a ações excepcionais como choques de veículos e de embarcações, tornam-se particularmente vulneráveis à ocorrência de graves danos ou colapsos. A figura 4 mostra a localização das zonas vulneráveis, com os respectivos modos de falha, em pilar-parede, pilar único, pilares duplos e múltiplos, travessas e aparelhos de apoio, estando cada um desses elementos associados às respectivas tipologias mais apropriadas de tabuleiros (laje, vigas múltiplas, unicelular e multicelular).

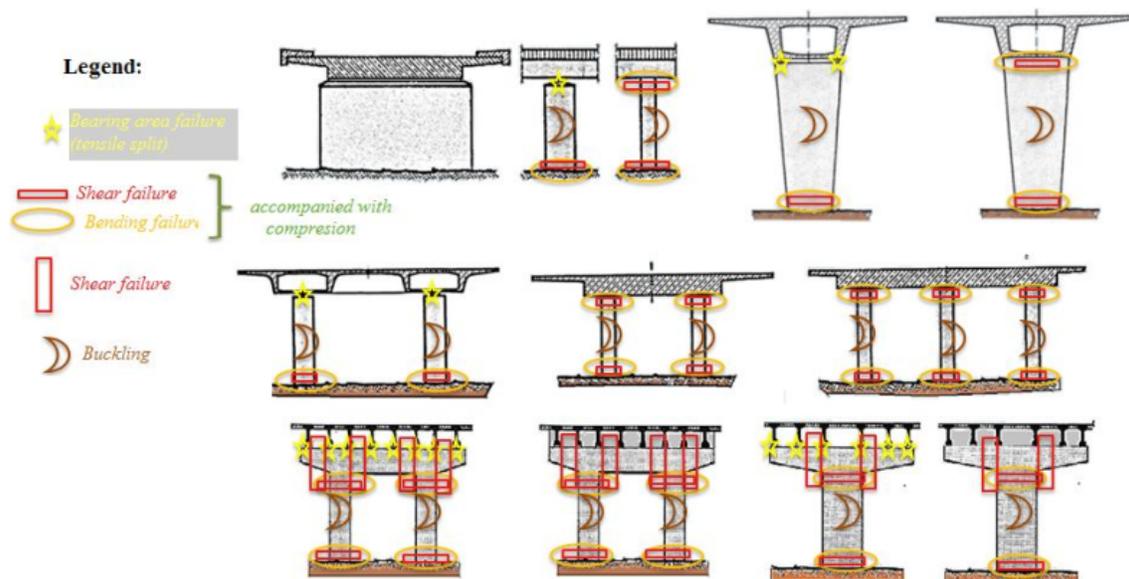


Figura 4 – Zonas vulneráveis relacionadas aos elementos da mesoestrutura de pontes típicas. (COST ACTION TU1406, 2018).

Na infraestrutura de uma Obra de Arte Especial, as zonas vulneráveis têm uma importância crucial para a confiabilidade da estrutura como um todo, pois uma falha em uma dessas regiões pode reduzir significativamente a resistência da obra e aumentar a possibilidade de falhas globais, inclusive por colapso progressivo.

Um exemplo típico é o caso de uma OAE submetida aos efeitos de erosão nas fundações depois de uma cheia, conforme o esquema da figura 5, que mostra as zonas vulneráveis de uma ponte com tabuleiro em vigas contínuas com as rótulas plásticas decorrentes dos efeitos do processo erosivo que provocou a rotação de um dos pilares. A figura também mostra os perfis iniciais e finais do leito do rio, a fossa de erosão sob a fundação e o nível da cheia.

Considerando que a erosão é um fenômeno de grande complexidade e que os seus efeitos sobre as fundações de uma ponte podem ser de tal intensidade que em determinadas situações geram falhas estruturais significativas e até o colapso total da obra, é essencial que para cada situação sejam estudados os mecanismos hidrodinâmicos e geotécnicos relacionados ao escoamento das águas que geram cavidades de erosão e o solapamento das fundações. As características geotécnicas do solo no local de implantação da obra merecem bastante atenção, pois exercem um papel determinante nos deslocamentos diferenciais que geram as rótulas plásticas indicadas na figura 5. Nesse sentido, um sistema estrutural redundante é de fundamental importância para redistribuir os esforços e evitar o colapso da ponte em uma situação de falha causada pela erosão.

De modo geral os danos causados pela erosão em uma ponte estão relacionados a diversos fatores, que devem ser considerados nas fases de projeto, construção e operação, como : velocidade, direção e altura da água; dimensões e uniformidade dos sedimentos do leito do rio; redundância do sistema estrutural da ponte; forma e quantidade de pilares na calha do rio; ângulo entre o escoamento e os pilares (escondidade); seção de vazão projetada; locação da ponte; concepção da fundação e modificação do leito original do rio.

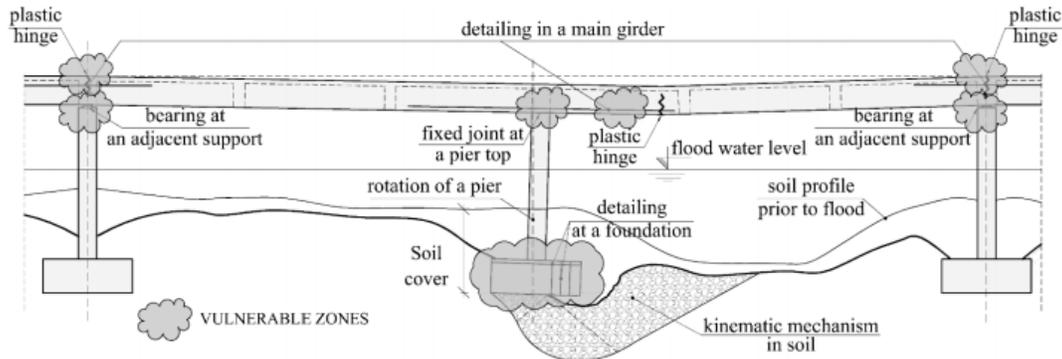


Figura 5 – Zonas vulneráveis e falhas causadas pela erosão na estrutura de uma ponte durante uma cheia. (COST ACTION TU1406, 2018).

Zonas vulneráveis em tabuleiros metálicos treliçados

As falhas estruturais que ocorrem nas pontes metálicas dependem de diversos fatores como o sistema estrutural, o tipo de aço, a qualidade das ligações, etc. Porém, os fatores que mais influenciam os danos e as manifestações patológicas nessas estruturas são a agressividade ambiental e a falta de conservação.

As pontes com tabuleiros em treliças isostáticas merecem especial atenção, por se tratarem de estruturas com pouca redundância. Nesse tipo de tabuleiro as ligações, geralmente compostas por chapas, parafusos e solda nas pontes atuais, e por rebites nas estruturas antigas, exercem uma grande influência para a ocorrência de falhas, pois nos sistemas reticulados a falha em uma ligação tende a gerar uma reação em cadeia que pode resultar na falha de toda a estrutura. Esse fenômeno é denominado colapso progressivo e foi responsável por grande quantidade de acidentes estruturais com pontes metálicas treliçadas em todo o mundo.

Na figura 6 estão representadas as zonas vulneráveis de uma ponte em treliças isostáticas metálicas, estando marcadas em vermelho as barras com altos esforços de compressão e em amarelo as barras com altos esforços de tração. Essas zonas são extremamente sensíveis às falhas originadas por corrosão, fadiga e deficiências nas ligações, entre outros fenômenos. A figura também mostra as zonas vulneráveis relacionadas aos aparelhos de apoio (em azul) e à erosão nas fundações (em verde).

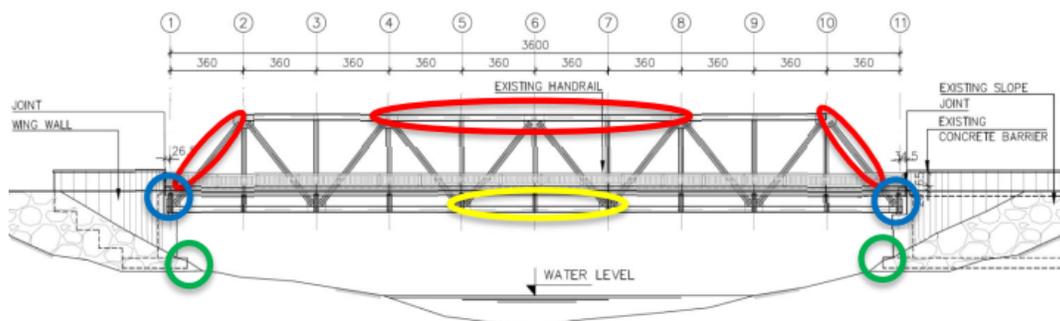


Figura 6 – Zonas vulneráveis em pontes com tabuleiro treliçado metálico isostático. (KEDAR, 2019).

Zonas Vulneráveis nas Pontes em Vigas Gerber

As pontes em vigas Gerber, muito utilizadas no passado, são estruturas isostáticas que podem colapsar por falha frágil nas articulações, que reduzem significativamente a seção transversal resistente ao esforço

cortante. Esse sistema simplificava o cálculo da estrutura, principalmente nas pontes com grande quantidade de apoios e quando não havia maiores conhecimentos sobre os recalques diferenciais nos apoios. Muitos dos problemas ocorridos com essas pontes foram decorrentes de erros no detalhamento das armaduras dos dentes Gerber, de infiltração de água nas juntas das articulações, e das dificuldades de manutenção, recuperação e reforço. Aconteceram muitos casos de colapso total decorrentes de falha frágil das articulações Gerber.

As pontes em viga Gerber são consideradas sistemas com fragilidades conceituais (Conceptual Weaknesses – CW) e estão praticamente em desuso nos projetos atuais, embora nas rodovias brasileiras existam muitas pontes antigas com esse sistema, parte delas já reforçada, mas algumas ainda em situação de risco.

A figura 7 ilustra esquematicamente as tipologias das pontes Gerber e as respectivas fragilidades conceituais. A figura 8 mostra um exemplo de dente Gerber com grandes danos no concreto e nas armaduras, pondo em risco a estabilidade do tabuleiro da ponte.

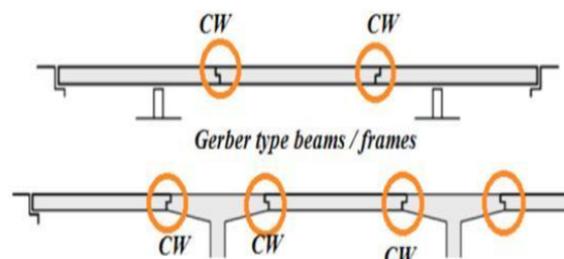


Figura 7 – Esquemas de pontes em vigas Gerber. Sistemas com fragilidades conceituais. (COST ACTION TU1406, 2018).



Figura 8 – Dente Gerber com grandes danos e risco de colapso do tabuleiro da ponte. (VITÓRIO, 2015)

Casos reais de Falhas Estruturais em Obras de Arte

Serão apresentados a seguir alguns casos de Obras de Arte Especiais que sofreram grandes falhas estruturais, localizadas ou globais, em decorrência das causas já relacionadas anteriormente. As falhas ocorridas contribuíram decisivamente tanto para o comprometimento das condições de funcionalidade, como para a perda das condições de estabilidade. Em todos os casos ficaram evidentes a grande influência

exercida pela deficiência de manutenção dessas estruturas ao longo do tempo, o que confirmou uma situação recorrente observada em quase todas as pontes, viadutos e passarelas das rodovias brasileiras que sofreram acidentes estruturais. A seguir, algumas dessas obras acidentadas, todas do sistema viário do Estado de Pernambuco.

Colapso de ponte sobre o Rio Gravatá – PE-545

Esse acidente estrutural, numa ponte antiga com tabuleiro em vigas contínuas de dois vãos, ocorreu em 2018 durante uma cheia no rio, que causou o solapamento da fundação e a rotação do pilar-parede central. Os encontros também foram danificados e o aterro de acesso foi destruído em uma das extremidades da ponte. Mesmo sendo uma ponte com boa redundância, propiciada pelas quatro longarinas com inércia variável, a intensidade da erosão gerou rótulas plásticas nos moldes das ilustradas na figura 5. A ponte, mesmo não desabando totalmente, tornou-se funcionalmente e estruturalmente inviável.

Ocorreram modos de falhas nas fundações, nos pilares, nos encontros e no tabuleiro, onde as vigas romperam por cisalhamento e flexão em decorrência de um deslocamento de grande magnitude no pilar-parede central. Uma análise realizada após o acidente recomendou a demolição e substituição por uma ponte nova. A figura 9 mostra o perfil longitudinal da ponte com os deslocamentos ocorridos após o acidente e o detalhe da ruptura das longarinas.



Figura 9 – Perfil da ponte e detalhe da ruptura das longarinas após o acidente estrutural. (VITÓRIO, 2019).

Ruptura de cabo em Passarela na BR-101/PE

Esse caso trata de uma passarela de pedestres estaiada, construída na década de 1970, que teve um dos estais rompidos em 2016. Como pode ser observado na figura 10 o vão de transposição da rodovia sob a passarela, com aproximadamente 45m, é sustentado por três linhas de dois estais paralelos, sendo um de cada lado. Um deles, localizado no meio do vão, rompeu bruscamente por causa da corrosão das cordoalhas no interior da bainha. A perda desse cabo, que fazia parte do par de estais mais solicitado, levou a uma redistribuição dos esforços que poderia ter causado o colapso progressivo dos cabos restantes e a falha frágil de toda a passarela, gerando uma situação de risco iminente pelas precárias condições dos outros cabos e dos blocos de ancoragem que apresentavam sinais de acentuada corrosão das placas, além de fissuração do concreto.

Como providencia emergencial foram colocadas duas torres metálicas de escoramento para evitar o desabamento da passarela, caso ocorresse a ruptura dos demais estais. Porém, até a presente data a passarela continua escorada provisoriamente e a obra de reforço ainda não foi iniciada. A figura 10 mostra os escoramentos provisórios e o detalhe da ruptura do cabo junto ao bloco de ancoragem.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual



Figura 10 – Passarela escorada após a ruptura de um estai e o detalhe da ancoragem após o rompimento do cabo. (VITÓRIO, 2019).

Danos na travessa de uma ponte na BR -101/PE

A figura 11 mostra as condições de uma travessa uma ponte com 40m de vão e tabuleiro com cinco vigas protendidas pré-moldadas, localizada em trecho da rodovia com intenso tráfego de veículos pesados.

É possível observar que a travessa e as duas primeiras vigas de uma das bordas do tabuleiro apresentam avarias generalizadas, inclusive com sinais de calcinação. A parte em balanço da travessa, que serve de apoio para a primeira viga, mostra deslocamento do concreto, armaduras expostas e corroídas e deformação visível. O berço de concreto sob a viga mostra sinais de esmagamento do aparelho de apoio em neoprene.

Essa situação envolve risco de falha estrutural da travessa, que poderá causar um colapso em uma das extremidades da ponte. A intensidade dos danos só poderá ser determinada por meio de uma análise estrutural, do conhecimento da resistência do concreto e da integridade das armaduras passivas e ativas, de modo a avaliar a redistribuição dos esforços em caso de colapso do balanço da travessa.



Figura 11 – Detalhe dos danos e deformação no balanço da travessa e nas extremidades das vigas do tabuleiro.

Colapso de Ponte Metálica em Treliças Isostáticas sobre o rio Pirapama

A ponte colapsada tinha 40m de extensão em um único vão, com duas treliças metálicas isostáticas e tabuleiro inferior; estava situada sobre o Rio Pirapama em uma rodovia rural no município de Palmares em Pernambuco. O colapso aconteceu em 2010 e foi causado pelo excesso de carga de um caminhão durante a transposição da ponte. Como se tratava de uma ponte antiga, a estrutura estava desatualizada para receber as cargas móveis atuais e não havia passado por qualquer manutenção ao longo do tempo, conforme pôde ser constatado pela análise das condições dos destroços das treliças após o acidente. Nesse caso ficou evidente que aconteceu colapso progressivo, iniciado por uma falha em um nó das ligações entre barras, que

transmitiu e ampliou os esforços aos outros nós subsequentes da treliça, aumentando significativamente as tensões de compressão e de tração, levando toda a estrutura ao colapso, conforme pode ser visto na figura 12 que mostra o que restou da estrutura metálica.



Figura 12 – Colapso progressivo nas treliças metálicas e ligações com acentuado grau de corrosão após o colapso da ponte. (VITÓRIO, 2019).

Colapso de ponte com tabuleiro misto na cidade de Goiana

Esse caso envolveu uma ponte de três vãos em vigas treliçadas metálicas e laje de concreto conectada às vigas, caracterizando uma estrutura mista. A ponte entrou em colapso durante a passagem de um caminhão cuja carga estava acima do limite da capacidade da estrutura, embora não existisse qualquer placa indicativa sobre a carga máxima para trafegar na obra. O avançado estado de corrosão da estrutura metálica, em especial das ligações dos nós das vigas treliçadas, foi determinante para a ocorrência do colapso progressivo que se iniciou nas proximidades de um determinado apoio, no exato instante da passagem do caminhão, e continuou com o aumento dos esforços nos nós subsequentes, que não suportaram o acréscimo e romperam com o veículo ainda sobre a ponte. A figura 13 mostra o colapso do tabuleiro durante a passagem do veículo, que caiu no rio, e também a forma como ocorreu a ruptura das vigas treliçadas; observar o avançado estado de corrosão das barras e dos rebites nas ligações dos nós da estrutura metálica.



Figura 13 – Colapso dos tramos metálicos treliçados durante a passagem de um caminhão. (VITÓRIO, 2019).

Conclusões

A análise conceitual apresentada sobre as falhas que acontecem nas estruturas das OAEs, complementada por alguns casos de acidentes reais ocorridos com pontes, viadutos e passarelas, pretende contribuir para a evolução do conhecimento e também para destacar a grande importância deste tema, que conta atualmente com uma rede de pesquisadores em diversos países, estudando os métodos voltados para o aperfeiçoamento dos projetos das pontes novas e para a garantia da segurança e funcionalidade das pontes existentes. Um exemplo concreto dessas pesquisas é a metodologia europeia COST ACTION TU1406 que serviu de base para os conceitos apresentados neste estudo, que procura integrar a prática da manutenção com a investigação científica, criando assim as condições apropriadas para uma futura normalização com a consistência necessária para reduzir as lacunas que ainda existem na literatura e nos procedimentos e ações das instituições responsáveis pela construção e gestão das OAE's.

Essa questão é especialmente importante em países como o Brasil, onde a manutenção ainda é uma ideia a ser melhor apreendida, considerando que são gastos recursos e tempo na execução de obras públicas, como é caso das pontes, mas não se dá a devida importância para manter essas obras em bom estado de funcionamento, tendo como consequência imediata a redução da vida útil e das condições de estabilidade e funcionalidade dessas obras.

Recomenda-se, portanto, que sejam feitos investimentos em estudos e pesquisas visando o desenvolvimento de procedimentos e normas apropriadas para a avaliação, recuperação e reforço das OAE's existentes, inclusive com modelos avançados, como os métodos probabilísticos, por exemplo. Porém, todo esse esforço técnico-científico só alcançará o sucesso pretendido se forem adotadas políticas e diretrizes apropriadas para a gestão das OAE's na malha rodoviária brasileira para, em consonância com as pesquisas desenvolvidas, garantir a elaboração de bons projetos, de uma boa conservação, e bons procedimentos, inclusive normativos, para a recuperação e o reforço das obras estruturalmente deficientes. A viabilização desses objetivos irá certamente propiciar, além de uma melhor utilização dos recursos públicos, maior segurança e conforto aos usuários das pontes, viadutos e passarelas do Brasil.

Referências

- BECK, A. T., Confiabilidade e Segurança das Estruturas. Elsevier Editora Ltda, 2019.
- COST ACTION TU1406., Technical Report, 2018.
- DNIT., Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias, 2004.
- KEDAR, A., MACHLEV, M., Joseph Bridge over the Jordan River – Israel. Case Study – Steel Truss Road Bridge, 2019.
- MATOS, J. C.; SANTOS, A., Metodologia Europeia para a Avaliação de Pontes. COST ACTION TU1406: Aplicação às pontes brasileiras. I Seminário de Pontes e Estruturas do Nordeste do Brasil, 2019.
- VITÓRIO, J. A. P., Conservação, Segurança Estrutural e Reforço de Pontes Rodoviárias de Concreto. VIII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2015.
- VITÓRIO, J. A. P., Falhas e Colapsos Estruturais em Pontes, Viadutos e Passarelas. I Seminário de Pontes e Estruturas do Nordeste do Brasil, 2019.