



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Critérios de Definição e Dimensionamento de Proteção de Pilares em Pontes

Marcus Alexandre Noronha de Brito¹, Bruno Emidio Sobrinho², Fabiana Cardoso Meirelles Mansur³

^{1,2,3} Dinamiza Consultoria e Engenharia LTDA / Departamento de Estruturas / contatos@dinamiza.eng.br
marcus@dinamiza.eng.br; brunno@dinamiza.eng.br ; fabiana@dinamiza.com.br

^{1,2} Universidade de Brasília – UnB / Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
¹ Instituto Federal de Brasília – IFB / Curso Técnico de Edificações

Resumo

O programa nacional que visa desenvolver o modal hidroviário para o transporte de cargas tem gerado uma grande preocupação com relação aos elementos estruturais de proteção de pilares nas pontes sobre rios navegáveis. A definição do tipo de proteção a ser adotada e o seu consequente dimensionamento é rigorosamente estabelecido por meio do estudo de critérios das mais diversas ordens para que se tenha plena funcionalidade e ofereça real segurança à estrutura. Este artigo apresenta alguns critérios para a determinação dos sistemas de proteção de pilares e seu devido dimensionamento, bem como o modelo estrutural utilizado.

Palavras-chave

Proteção de Pilares; Definição; Dimensionamento.

Introdução

A elaboração de projeto executivo de obras de engenharia para sistemas de proteção de pilares tem como objetivo proteger os pilares do vão ou dos vãos navegáveis de pontes contra eventuais colisões de embarcações que trafegam em águas navegáveis, sejam elas de mares ou de rios. Tais sistemas são dimensionados tendo por critério suportar choques frontais ou laterais, utilizando como valores de referência os máximos operacionais característicos de cada região obtidos através de um estudo de navegação.

Independente do tipo de sistema de proteção de pilares a ser adotado, o mesmo visa proteger os elementos da infraestrutura e da mesoestrutura contra o choque de embarcações.

Dentre os tipos principais de proteção de pilares de pontes podem-se citar as elásticas, que operam na base da deformação do sistema, com absorção de energia elástica. A massa total do sistema de proteção deve ser capaz de absorver toda a energia de choque sem que seja transmitida nenhuma energia para a estrutura dos pilares, mantendo totalmente íntegra a estrutura. O outro tipo são as proteções de pilares de gravidade, que usam a energia do choque para fazer subir o baricentro de um determinado peso. Além desses dois tipos existem as defensas metálicas e as que tiram proveito de fenômenos diversos, tais como: compressão do ar, flutuação de pontões, dentre outros.

A importância da adoção de elementos de proteção como esses se torna cada vez mais evidente quando se levam em conta as consequências que a ausência destes sistemas ou um



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

dimensionamento incorreto dos mesmos podem provocar desde perdas econômicas significativas à perda de vidas humanas, o que é mais grave ainda.

A importância da implantação de sistemas de proteção de pilares de pontes

Se precaver de possíveis problemas relacionados com acidentes devidos a colisões de embarcações em pilares de pontes é algo essencial, pois além de se salvar vidas, impede-se que problemas logísticos de transporte ocorram, como por exemplo as interrupções de tráfegos de grandes rodovias, ou até mesmo de uma ferrovia.

Um fato recente para comprovar tal importância foi o acidente ocorrido em uma ponte da Alça Viária sobre o Rio Moju, no Pará, onde após uma balsa ter colidido com a estrutura da mesma, no dia 23 de março de 2014, foi rompida parte da estrutura, que possuía cerca de 900 metros de extensão, com 23 vãos e que teve cerca de 50 metros de sua extensão destruída. A mesma estava localizada no quilômetro 48 da rodovia PA-483. A embarcação causadora do acidente transportava óleo de dendê, e destruiu um dos pilares da obra de arte especial, localizada a cerca de 120 km de Belém. A ponte danificada faz parte de um complexo de pontes e estradas que liga Belém aos municípios do interior do estado. A figura 1 seguinte mostra o panorama aéreo da ponte após a colisão.



Figura 1 – Panorama aéreo da ponte após colisão. (Fonte: Antônio Silva/Agência Pará Site: <http://g1.globo.com/pa/para/noticia/2014/03/ponte-da-alca-viaria-ficara-seis-meses-interditada-apos-acidente-com-balsa.html>)

Neste caso, o incidente não ocorreu devido à má sinalização na via ou mesmo por ter um canal de navegabilidade (vão de navegação) insuficiente, uma vez que o mesmo possuía cerca de 80 metros de largura e os outros vãos não navegáveis cerca de 40 metros de largura. A embarcação que colidiu tinha 60 metros de comprimento e 12 metros de largura e transportava além da carga de óleo de dendê, uma tripulação de segurança formada por 4 ou 5 pessoas. A colisão ocorreu fora do vão de navegação, na margem esquerda, sentido



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Moju/Belém no Pará. A figura 2 a seguir mostra detalhe do estado da superestrutura da ponte após a colisão.



Figura 2 – Estado de comprometimento da ponte após colisão (Fonte: Divulgação/PRF Site: <http://g1.globo.com/pa/para/noticia/2014/03/ponte-da-alca-viaria-ficara-seis-meses-interditada-apos-acidente-com-balsa.html>)

Para melhor compreensão da carga transportada, a embarcação carregava cerca de 900 toneladas de materiais, somados à massa da embarcação. Quando não é adotada a velocidade de segurança (conforme a tabela 1 seguinte) para travessia sob esses vãos navegáveis, medidas de segurança já previstas pelas administrações hidroviárias existentes, podem ser geradas energias de impacto de grande magnitude que podem ocasionar danos catastróficos como o ocorrido, devido à não existência de proteção de pilares para a ponte.

Tabela 1 – Valores máximos de operação (Fonte: Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN da Marinha do Brasil - MB, segundo sua publicação no Aviso aos Navegantes da Hidrovia Tietê-Paraná do primeiro trimestre de 2013)

Condição do comboio	Velocidade máxima em colisão frontal	Velocidade máxima em colisão lateral (incidindo com ângulo de 15 graus sobre a proteção) (m/s)
Vazio	1,00	2,00
Carregado	0,80	1,50

Com relação às dificuldades causadas por esse acidente podem-se citar: perigo de mortes e danos físicos aos envolvidos; interdição da via por no mínimo 6 meses; uso de balsas para travessia de carretas, caminhões e veículos de passeio, trazendo custos adicionais aos usuários da rodovia; execução de laudo pericial para possíveis ações a serem tomadas; projeto de reparo da estrutura; maior fiscalização das vias e do tipo de embarcação que navegam nessas



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

áreas, ou seja, uma série de implicações danosas ao funcionamento normal da via devido a não utilização dos sistemas de proteção de pilares de pontes.

Critérios iniciais para determinação de sistemas de proteção de pilares de pontes

Para o dimensionamento dos diversos elementos estruturais de uma proteção de pilares de pontes observam-se sempre as diretrizes fornecidas pelas Administrações Hidroviárias, que em geral fornecem dados como: velocidade de traslado, ângulo de choque, dentre outras. As informações repassadas pelas Administrações Hidroviárias são complementadas com os estudos de navegação que contemplam considerações sobre o comboio tipo que navega nessas regiões.

Para exemplificar melhor o dimensionamento dos diversos elementos estruturais da proteção de pilares, devem-se observar as premissas determinadas por alguns órgãos, tais como: a Marinha do Brasil (MB) no que tange o ângulo de ataque (15 graus) e a velocidade máxima de cruzamento (0,80 m/s), assim como as considerações do comboio tipo após estudos realizados pelo Ministério dos Transportes. As características do comboio-tipo utilizado como exemplo podem ser observadas na figura 3 e na tabela 2 apresentadas a seguir.

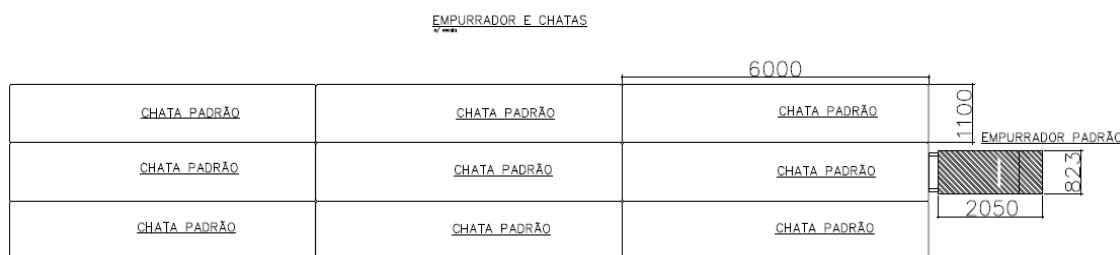


Figura 3 – Esquema do comboio-tipo Triplo Tietê

Tabela 2 – Características do comboio-tipo

Características do empurrador	Valores
Comprimento L_e (m)	20,50
Boca B_e (m)	8,23
Pontal P_e (m)	2,90
Calado de Operação D_e (m)	2,20
Deslocamento Máximo DW_e (tf)	245,00
Características da Chata	Valores
Comprimento L_c (m)	60,00
Boca B_c (m)	11,00
Pontal P_c (m)	3,36
Calado leve DI_c (m)	0,40
Calado de Operação DO_c (m)	3,00
Peso leve W_c (tf)	230,00
Deslocamento Máximo DW_c (tf)	2000,00
Características do Comboio	Valores
Comprimento L_t (m)	200,50
Boca B_t (m)	33,00
Deslocamento Máximo DW_t (tf)	18.245,00
Velocidade máxima em reservatórios V_m (m/s)	3,89



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21,22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Estes estudos contemplam principalmente aspectos relacionados à capacidade de carga transportada dentro de cenários de navegação em determinada malha hidroviária, envolvendo também o Ministério dos Transportes e as Diretorias Aquaviárias – DAQ do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT.

Dimensionamento de sistemas de proteção de pilares de pontes

Para um melhor entendimento de como ocorre um dimensionamento de um sistema de proteção de pilares, serão utilizados como exemplo dados relativos a um sistema de proteção dito por gravidade, também conhecido como dolphins. Seu pré-dimensionamento é realizado mediante a determinação da energia obtida com o choque mecânico nas condições necessárias de choque direto e de choque lateral com ângulo de incidência de 15° ou outro valor estabelecido pelo órgão. Essa energia de impacto para choque frontal pode ser determinada pela equação 1:

$$E_d = c \frac{1}{2} m v_p^2 \quad (1)$$

Onde $c=1,0$, constante de forma, relativa ao ângulo de incidência de choque $\alpha=0$, cujo valor mínimo é 0,2; e pode ser representada pela equação 2:

$$c = \frac{1}{1 + \frac{l^2}{r^2}} \quad (2)$$

Onde "l" é a distância entre o centro de gravidade da embarcação e o ponto de choque e "r" o seu respectivo raio de giração, dado por $l/4$.

Define-se nas equações 3 e 4 c e α :

$$c = \frac{1}{1 + 16\alpha^2} \quad (3)$$

$$\alpha = l/L \quad (4)$$

Onde L é o comprimento total da embarcação.

Para o *Deadweight* ou peso deslocado máximo, pode-se utilizar como exemplo, o $DWt = 18.245$ tf; com isso obtemos o deslocamento máximo de projeto $Wt = 1,2 \times 18.245,00$ tf = 21.894,00 tf. Assim tem-se a expressão 5:

$$m = \frac{21.894,00}{9,81} = 2.231,8 \text{ tpb} \quad (5)$$

Pode-se considerar também uma velocidade de travessia na condição de choque frontal, por exemplo, de $v_p = 0,80$ m/s, sendo a energia expressa pela equação 6:



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



$$E_p = 1 * 0,5 * 2.231,8 * 0,8^2 = 714,17 \text{ t.m} \quad (6)$$

A possibilidade de choque frontal gera nas condições exigidas uma energia de 714,17 t.m. Imagina-se na geometria uma forma angular aguda de forma que por menor que seja a possibilidade de incidência com $\alpha=0^\circ$, a trajetória da embarcação seria desviada para o seu curso normal, ou no mínimo aumentando o seu ângulo de incidência de 15° , o que será verificado como condição de dimensionamento da geometria a ser adotada. Para a determinação da energia de impacto para choque frontal utiliza-se o coeficiente de forma, elevado para 15° em função das condições geométricas da distância entre o centro de gravidade e o ponto de colisão "l", assim como o seu raio de giração "r".

Sendo assim, a energia de impacto nas condições supracitadas é dada conforme a equação 7:

$$E_p = 0,3 * 0,5 * 2.231,8 * 1,5^2 = 48,34 \text{ tm} \quad (7)$$

Com isso, a energia a ser absorvida pelo conjunto de proteção, supondo que o sistema adotado é de concreto armado e tem como características a título de exemplo, $\sigma_c = 30 \text{ MPa}$ (tensão do concreto) e $E=26071 \text{ MPa}$ (módulo de elasticidade do concreto), obtém-se a equação 8:

$$W = I/y_{cg} \quad (8)$$

Substituindo, obtém-se:

$$W = \frac{18714,43}{18,48} = 1012,68 \text{ m}^3 \quad (9)$$

E por meio da equação 10, obtém-se as expressões 11, 12 e 13:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (10)$$

$$M = 30000 * 1012,68 = 30380568,18 \text{ kN} \quad (11)$$

$$F = \frac{M}{h} = \frac{30380568,18}{30} = 1012685,6 \text{ kN} \quad (12)$$

$$E = \frac{1}{6} \frac{F^2 h^3}{EI} = \frac{1}{6} \frac{1012685,6^2 * 30^3}{26071 * 10^3 * 18714,43} \quad (13)$$

Em resumo, no exemplo ilustrado alcança-se por meio dos parâmetros escolhidos, uma energia suficiente para absorver o impacto de uma embarcação qualquer, como mostrado na expressão 14 a seguir.

$$E = 9458,61 \text{ kN.m} = 945,86 \text{ t.m} > E_p \quad (14)$$



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21,22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Análise estrutural

A análise estrutural foi feita utilizando-se o programa computacional Midas FEA, que é uma ferramenta baseada no Método dos Elementos Finitos. Devido às dimensões e à complexidade desta estrutura, optou-se por utilizar um modelo espacial composto por elementos sólidos, com os quais é possível simular com maior precisão o comportamento real da estrutura e analisar os esforços ao longo da espessura dos elementos.

A análise com elementos sólidos apresenta como resultados os deslocamentos, as deformações e as tensões na estrutura. Para desenvolver o dimensionamento da proteção dos pilares, foram estabelecidas algumas seções críticas onde as tensões foram integradas de modo a se ter cargas e momentos. Esses esforços foram então utilizados e o dimensionamento foi feito considerando o Estado Limite Último (ELU), conforme recomenda a ABNT NBR 6118:2007. O panorama geral da estrutura pode ser observado na figura 4 seguinte.

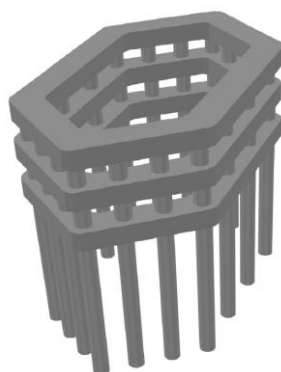


Figura 4 – Panorama geral em 3D do sistema de proteção de pilares adotado

Modelo estrutural

Para determinar os esforços na estrutura, o sistema de proteção de pilares foi modelado conforme apresenta a figura 5 a seguir. Nela é possível se observar que se utilizou da unidade básica que a compõe e que juntamente com os outros 2 (seis) anéis, formam o sistema de proteção de pilares a ser modelado.

As estacas foram modeladas de forma contínua e juntamente com as estruturas dos anéis (lajes e paredes) geraram um comportamento monolítico capaz de propiciar ao conjunto de proteção, também denominado dolfim, a capacidade de absorver o choque máximo previsto pela velocidade máxima da embarcação tipo (constantes nas memórias justificativas e descritivas) para que não sejam originadas deformações capazes de transferir qualquer carregamento sobre os pilares hiperestáticos que compõem o vão navegável em questão.

O dimensionamento se dá pelo princípio básico de que o sistema de proteção de pilares se comporta com a máxima rigidez possível, sendo sistemas naturalmente adotados para estudos probabilísticos de choque de embarcações de alta capacidade de carga como o caso das adotadas como embarcações-tipo, segundo o previsto pela Administração da Hidrovia.

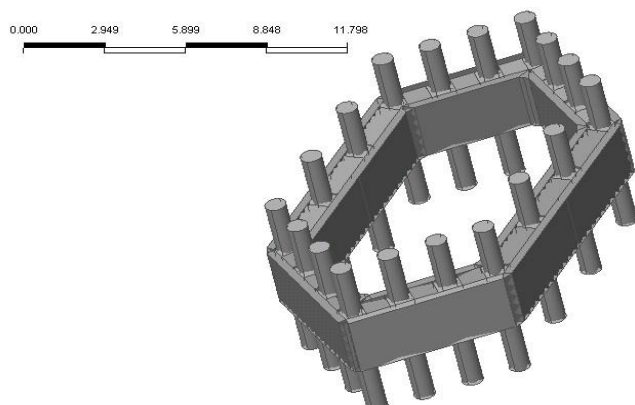


Figura 5 – Modelo estrutural utilizado para o sistema de proteção de pilares

A modelagem numérica em elementos finitos sólidos tetraédricos foi realizada obedecendo à real utilização dos materiais distintos utilizados, como a estrutura de proteção, contenção e estabilização concebidas em concreto armado e o material em areia para preenchimento e consequente amortecimento para que se minimizem os prejuízos com relação à destruição das paredes em caso de choque mecânica embarcação-estrutura. A figura 6 seguinte mostra os elementos componentes utilizados na modelagem da estrutura.

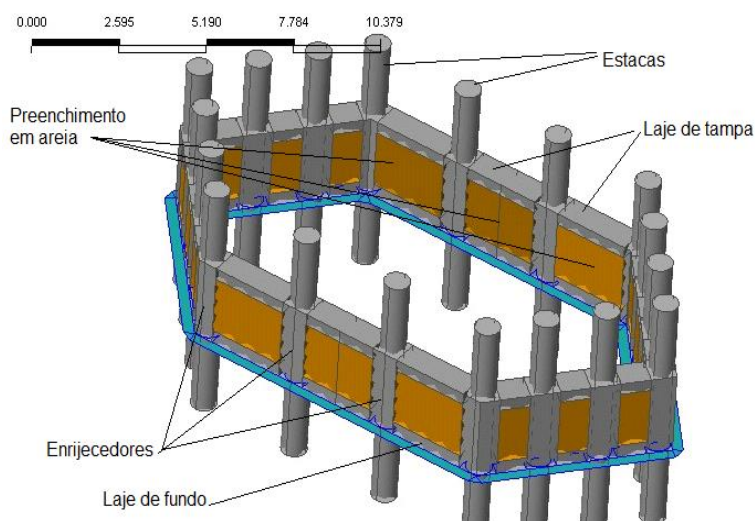


Figura 6 – Visualização dos elementos componentes utilizados

No processo de modelagem foram utilizados 25.219 elementos finitos que constituem o modelo matemático do preenchimento de areia das células de absorção de energia de impacto como pode ser observado na figura 7.

Na concepção de análise deste modelo foi concebida a interface de não linearidade Coulomb Friction disponível no pacote computacional MIDAS FEA® utilizado para a análise numérica através do Método dos Elementos Finitos. Tal interface permite a garantia da representação do real comportamento da transmissão de carregamentos de compressão decorrentes do contato solo-estrutura, gerando resistências num plano de cisalhamento definido, porém sem transferir solicitações de tração, inexistente nestes contatos.

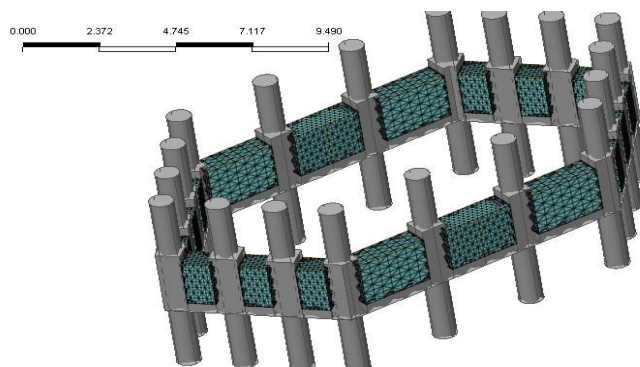


Figura 7 – Modelo matemático das células de absorção de energia de impacto em areia

As células de absorção de energia constituem-se em câmaras isoladas, possibilitando um plano de manutenção e recuperação parcial da estrutura em caso de dano ou colapso localizado quando do choque em pontos específicos. O isolamento das câmaras de areia pode ser melhor visualizado na figura 8.

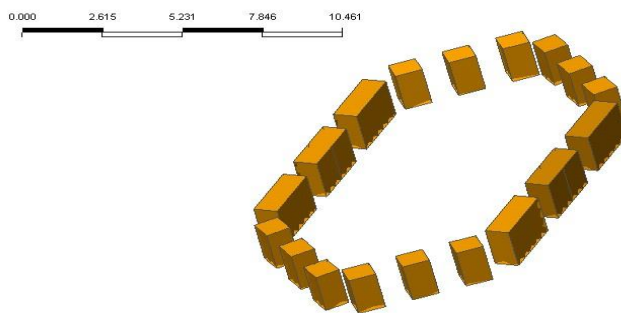


Figura 8 – Câmaras de areia

Na figura 9, verifica-se a condição de contorno utilizada para o desenvolvimento da análise, com engastes perfeitos em translações e rotações em todos os eixos (tridimensionalmente). Na conexão superior da estaca orientou-se pela não utilização de contatos, oferecendo assim aos resultados numéricos valores mais favoráveis à segurança, uma vez que o anel superior não dispõe deste tipo de contato, impondo-se desta maneira comprimentos de flambagem de cálculo maiores.

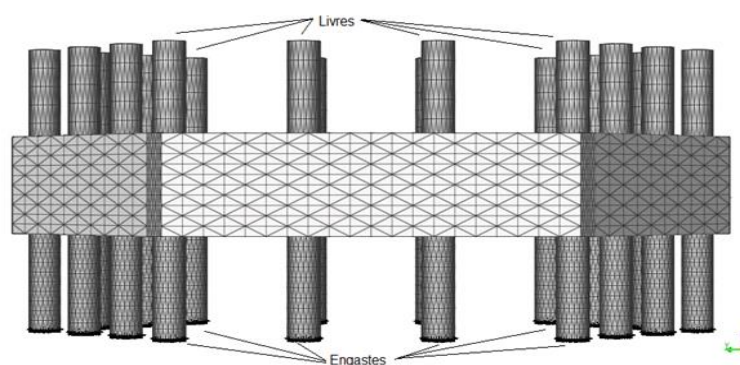


Figura 9 – Modelo matemático da estrutura de concreto – Vista Lateral



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Conclusões

Os riscos provocados pelo alto volume de tráfego hidroviário, pelas dimensões das embarcações modernas, pelas condições meteorológicas, idade e localização de determinadas pontes suscitam a necessidade da adoção de sistemas de proteção dos elementos estruturais de obras de arte especiais, neste caso pontes. Em suma, devido às características de navegabilidade é indispensável a adoção de sistemas de proteção dos pilares nas pontes. Para tanto é essencial que seja compatibilizada a avaliação detalhada das condições de canal de navegação, do comboio tipo, do levantamento batimétrico e hidrológico do local de travessia, aplicando por exemplo os sistemas por gravidade, tipo dolphins. Esse sistema de proteção se mostra mais eficaz quando a obra de arte especial não se localiza em meio urbano, o que possivelmente facilitaria qualquer reparo necessário em caso de choque mecânico com embarcações.

Em comparação aos sistemas de proteção flutuantes, esta eficiência se faz mais presente no que tange a esse tipo de proteção quando em operação dinâmica de elevação e no recolhimento das correntes de fundeio por se tratar de um sistema dinâmico, porém essa operação torna-se demasiadamente onerosa devido à alta variação de nível de água desse trecho.

Nesse sentido, foi evidenciado no simples pré-dimensionamento envolvido nesse tipo de sistema, a sua eficácia na absorção de energia de impacto, quando envolvidas embarcações com elevadas massas.

Outro ponto relevante foi a apresentação de um fato ocorrido recentemente relacionado à colisão de uma balsa diretamente com os pilares de uma ponte e a catástrofe que isso acarretou. Mais uma vez, comprova-se a seriedade do assunto e a magnitude dos impactos causados por esse tipo de acidente que claramente pode ser amenizado ou mesmo ter diminuídos seus impactos.

Referências

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). "Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges", Washington, D.C. 1991.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). "Standard Specifications for Highway Bridges", Washington, D.C. 1996.
- AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION (AFPA) AND AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). Supplement to National Design Specification for Wood Construction, Washington, D.C. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, NBR 6118. Rio de Janeiro, 2007.
- AVISO AOS NAVEGANTES DA HIDROVIA TIETÊ-PARANÁ – Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN da Marinha do Brasil – MB. 1º Trimestre de 2013.
- PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF NAVIGATIONAL CONGRESS (PIANC). "Report of the International Commission for Improving the Design of Fender Systems, Supplement to Bulletin No. 45", Brussels, Belgium. 1984.