



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Análises Qualitativa e Quantitativa dos Materiais Utilizados na Reconstrução da ponte Sobre o Rio Moju no Pará Cristiano Comin¹, Adler Teixeira de Souza², Remo Magalhães de Souza³, Felipe Ricardo Farias de Sousa⁴

¹Dynamis Techne/ Universidade Federal do Pará/ Cristiano.comin@dyntech.com.br

²Dynamis Techne/ Universidade Federal do Pará / adler.souza@dyntech.com.br

³Dynamis Techne/ Universidade Federal do Pará /remo@dyntech.com.br

⁴Universidade Federal do Pará/Programa de Educação Tutorial/felipe.sousa@itec.ufpa.br

Resumo

A colisão com uma balsa, em março de 2014, levou à ruptura de um pilar de concreto armado e consequente fratura e colapso de dois vãos da ponte sobre o rio Moju (ponte Moju-Cidade), integrante do complexo da Alça Viária (PA-483), no estado do Pará. Para a avaliação do comportamento estrutural da ponte, desenvolvimento do projeto de reforço, e o próprio processo de recuperação/reconstrução da parte da estrutura que foi danificada durante o acidente, foi fundamental que se verificassem as propriedades mecânicas dos principais materiais empregados na estrutura. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi apresentar os resultados dos ensaios realizados em corpos de prova de concreto e de aço, extraídos da superestrutura da Ponte, determinando as principais propriedades mecânicas destes materiais. Assim, para o concreto foram obtidos a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade, e para o aço foram obtidas as tensões de escoamento e ruptura, além do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Os resultados experimentais, após análises estatísticas, foram obtidos com os parâmetros estabelecidos pelas normas vigentes NBR 7680-1:2015, NBR 8522:2003, NBR 6892:2002 e NBR 6116:2014.

Palavras-chave

Pontes; Análise Qualitativa; Análise Quantitativa; Reabilitação Estrutural; Materiais.

Introdução

Em 23 de março de 2014, houve a colisão de uma balsa carregada com dendê contra um dos pilares da ponte sobre o rio Moju, no estado do Pará. Tal impacto levou à ruptura do pilar e consequente colapso dos dois vãos adjacentes, conforme é mostrado nas Figuras 1 e 2.

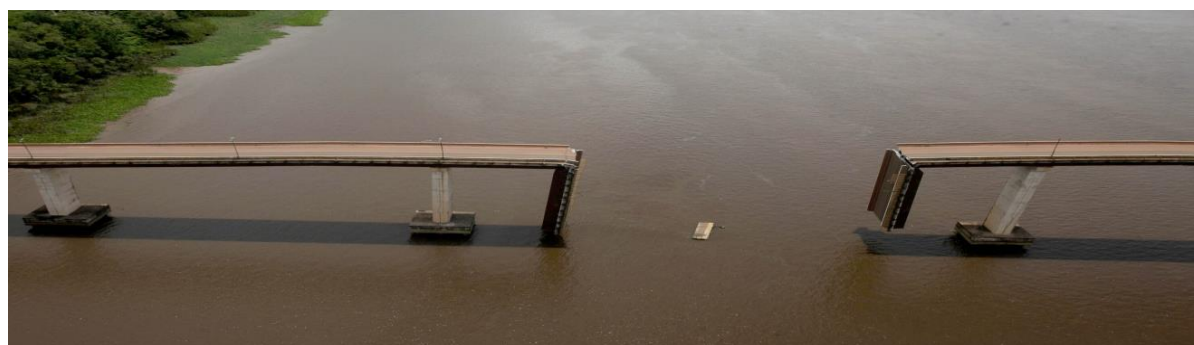


Figura 1- Vista aérea da Ponte após acidente e colapso do tabuleiro

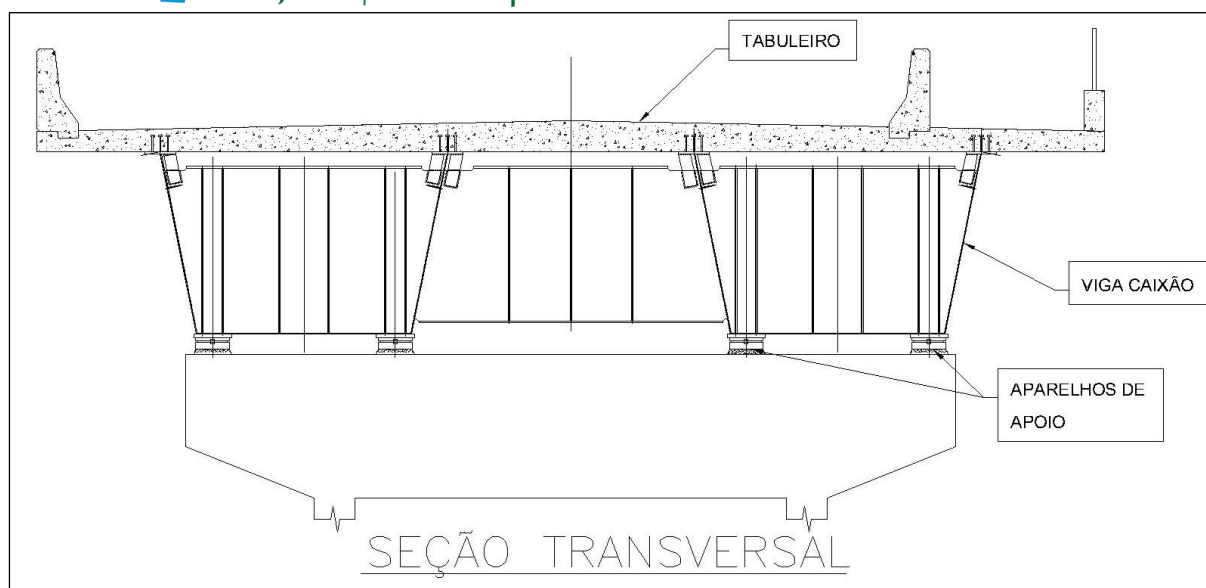


Figura 2- Seção transversal da ponte

Esta ponte integra o complexo da Alça Viária (PA-483), importante via de integração e escoamento da produção mineral e agropecuária no Estado do Pará.

Com o intuito de reabilitar a estrutura, foi efetuada a recuperação e o reforço da mesma. Cabe citar, que segundo CARMONA (2005), reforço é qualquer intervenção estrutural que vise o aumento da resistência rigidez e/ou ductilidade dos seus elementos, de forma a melhorar o seu desempenho em relação ao estado inicial e por reparação todas as ações que tenham como finalidade repor os níveis de desempenho da estrutura inicial.

É essencial que os materiais de construção utilizados em uma estrutura de grande responsabilidade, como é o caso de uma ponte, sejam produzidos com grande rigor, entendendo-se que o controle de qualidade dos mesmos é fundamental. Segundo GOMÉZ (2002), para o concreto endurecido o controle é usualmente efetuado ao nível das características físicas e químicas. No que diz respeito às primeiras, os ensaios disponíveis permitem avaliar a capacidade resistente à compressão, a aderência nas ligações entre diferentes concretos, a porosidade, a compacidade e a integridade interna.

Tratando-se especificamente de uma obra de reabilitação/ reforço, a importância do controle dos materiais componentes estruturais é ainda mais crítica, conforme afirma COIAS (2002). Quando se efetua um projeto de reabilitação, além dos seus mecanismos de deterioração, métodos disponíveis de avaliação da segurança, medidas de proteção e técnicas de reabilitação, é fundamental que se conheça bem as características dos materiais. Desta forma, foi objetivo geral deste trabalho apresentar os resultados dos ensaios realizados em Corpos de Prova (CP's) de Aço e Concreto extraídos da superestrutura existente da Ponte sobre o Rio Moju. Como objetivos específicos do trabalho, tem-se:

- Obter a resistência à compressão axial (f_{ck}) dos testemunhos de concreto extraídos da laje do tabuleiro da ponte, seguindo o procedimento prescrito pela NBR 7680-1:2015;
- Obter o módulo de elasticidade (E) dos testemunhos de concreto extraídos da laje do tabuleiro da ponte, seguindo o procedimento prescrito pela NBR 8522:2003;



- Obter as tensões de escoamento (f_y) e de ruptura (f_u) do aço utilizado nos caixões metálicos da ponte, a partir dos exemplares obtidos conforme procedimento prescrito pela NBR 6892:2002;
- Obter o módulo de elasticidade longitudinal (E) e o coeficiente de Poisson (ν) do aço utilizado nos caixões metálicos da ponte, a partir dos exemplares obtidos conforme procedimento prescrito pela NBR 6892:2002.

Metodologia

Testemunho de concreto

Preparação

Foram extraídos 18 (dezoito) testemunhos do tabuleiro da ponte, dos quais 10 (dez) no módulo 5 (aqui também denominado de MD, Módulo do lado Direito) e 8 (oito) no módulo 6 (aqui também denominado de ME, Módulo do lado Esquerdo).

Para ambos os módulos, os CP's foram extraídos na região da laje do tabuleiro que fica sobre os caixões metálicos, sendo metade sobre o caixão à montante e metade sobre o caixão à jusante. Assim, para o módulo 05 foram obtidos 5 (cinco) CP's de cada lado e para o módulo 06 foram obtidos, 4 (quatro) CP's de cada lado. Os testemunhos foram então cortados para regularização das suas superfícies e remoção de imperfeições decorrentes do processo de extração. A Tabela 1 apresenta a relação dos CP's ensaiados a partir da nomenclatura adotada e as suas respectivas dimensões. A nomenclatura adotada foi a seguinte:

- MD – Módulo do lado Direito (Módulo 05);
- ME – Módulo do lado Esquerdo (Módulo 06);
- FJ – Face Jusante;
- FM – Face Montante;
- LT – Laje do Tabuleiro;
- 01 – CP 01 da região de extração.



Tabela 1 - Relação de testemunhos de concreto extraídos

CP	d (cm) (diâmetro)	h (cm) (altura)
MD-FJ-LT- 01	10,00	19,50
MD-FJ-LT-02	10,00	18,20
MD-FJ-LT-03	10,00	19,50
MD-FJ-LT-04	10,00	20,00
MD-FJ-LT-05	9,30	15,80
MD-FM-LT-01	10,50	17,10
MD-FM-LT-02	10,50	11,50
MD-FM-LT-03	10,50	16,20
MD-FM-LT-04	10,50	12,50
MD-FM-LT-05	10,00	19,80
ME-FJ-LT-01	9,30	14,40
ME-FJ-LT-02	9,30	16,60
ME-FJ-LT-03	9,30	17,80
ME-FJ-LT-04	9,30	17,20
ME-FM-LT-01	9,30	18,80
ME-FM-LT-02	10,00	14,20
ME-FM-LT-03	9,30	16,00
ME-FM-LT-04	9,30	11,70

Ensaio de compressão axial e módulo de elasticidade

Os testemunhos de concreto foram posicionados no centro da máquina de ensaio universal e submetidos a um processo de escorvação, que consiste em três ciclos de carregamento e descarregamento sucessivos até o limite de 30% da tensão de ruptura estimada, conforme a NBR 8522:2003, a qual segundo o projeto original estaria em torno de 25 MPa. Durante os três ciclos, as deformações sofridas pelo testemunho foram monitoradas com o uso de dois extensômetros do tipo *clip-gages* (ver Figura 3). Posteriormente, esses testemunhos são carregados até sua ruptura para determinação da resistência à compressão. Utiliza-se para este processo discos de neoprene confinados em anéis metálicos nas extremidades do testemunho ensaiado, para a correta distribuição das tensões aplicadas pela máquina de ensaio. Ao final do ensaio os resultados de módulo de elasticidade e da tensão de ruptura são fornecidos pelo *software* da máquina de ensaio, os quais são calculados de acordo com os procedimentos prescritos pela NBR 8522:2003.

O valor da resistência característica do concreto foi obtido através da equação (1), na qual se obtém a tensão de ruptura inicial do concreto ensaiado, e da equação (2), onde se aplicam fatores de correção prescritos na NBR 7680:2015, os quais são funções da relação h/d dos testemunhos ensaiados, do broqueamento (função, por sua vez, do diâmetro do testemunho), da direção da extração em relação ao lançamento do concreto e do efeito da umidade do testemunho.

$$f_{c,ex,inicial} = F/A \quad (1)$$

onde:

$f_{c,ex,inicial}$ - Tensão de ruptura inicial, obtida no ensaio;

F- Carga de Ruptura;

A – Área da seção transversal do testemunho;

$$f_{ci,ext} = [1+(K1+K2+K3+K4)]. f_{ci,ext,inicial} \quad (2)$$

onde:

$f_{ci,ext}$ - Tensão de ruptura estimada;

K1 - fator de correção dependente da relação h/d;

K2 - fator de correção dependente do efeito do broqueamento em função do diâmetro do testemunho;

K3 - fator de correção dependente da direção da extração em relação ao lançamento do concreto;

K4 - fator de correção dependente da umidade presente no testemunho;



Figura 3 - Testemunho MD FJ LT T02 posicionado na máquina de ensaios



CP's de Aço

Os corpos-de-prova de aço foram fornecidos pela Contratante, em número de 08 (oito), os quais foram agrupados pelas suas dimensões (comprimento, largura e espessura), conforme apresentado na Tabela 2. O aço destes corpos-de-prova é do tipo USI-SAC-50, segundo o projeto original da Ponte, que é equivalente ao AÇO USI-SAC-350 atual.

Os CP's de aço foram usinados com o objetivo de reduzir a sua seção transversal na região central para garantir a ocorrência de ruptura neste trecho. A seção transversal das extremidades foi mantida para a sua fixação nas garras metálicas da máquina universal de ensaios.

Tabela 2 - Relação de corpos-de-prova de aço

CP	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Região de extração no caixão metálico
MOJU CP1	500	50	10,0	Alma
MOJU CP2	500	50	10,0	Alma
MOJU CP3	500	30	12,5	Mesa Inferior
MOJU CP4	500	30	12,5	Mesa Inferior
MOJU CP5	200	30	12,5	Mesa Inferior
MOJU CP6	200	30	12,5	Mesa Inferior
MOJU CP7	200	30	12,5	Mesa Inferior
MOJU CP8	320	30	19,0	Mesa Superior

Para a determinação do Módulo de Elasticidade e do Coeficiente de Poisson, foram instalados dois extensômetros de resistência elétrica da marca *Kiowa* em cada CP, dos quais um na direção longitudinal e outro na direção transversal, conforme ilustrado na Figura 4. As deformações dos CP's durante os ensaios foram monitoradas através de um sistema de aquisição de dados do tipo ADS 2000, da marca *Lynx* (ver Figura 5).



Figura 4 – Instalação de extensômetros em um dos CP's de aço

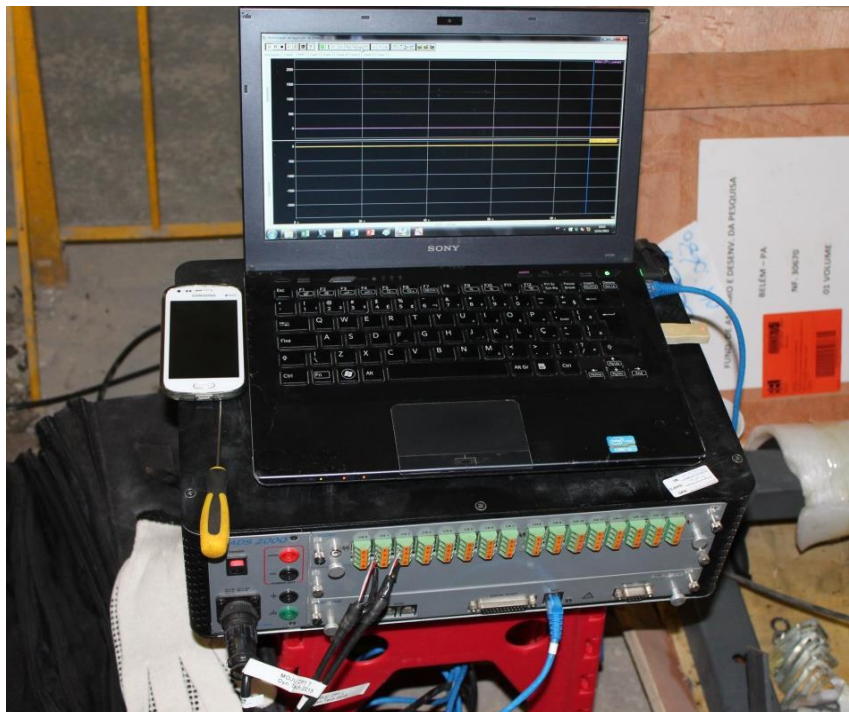


Figura 5 – Sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios



Figura 6 – CP3 durante e após o ensaio

Para a determinação da tensão de escoamento e tensão de ruptura foram seguidos os procedimentos prescritos pela NBR 6892:2002, sendo monitoradas as deformações longitudinal e transversal da região instrumentada, a carga aplicada e o deslocamento da mesa da máquina de ensaio.

Resultados

Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos testemunhos de concreto

Na Tabela 3 apresentam-se os valores de resistência à compressão dos testemunhos após tratamento estatístico e eliminação dos resultados espúrios. Obteve-se valor de resistência à ruptura média igual a 25,02 MPa, o qual é próximo ao valor de f_{ck} de projeto de 25 MPa.

Tabela 3 - Resistência à compressão após tratamento

CP	$f_{ci,ext}$ (MPa)
MD-FJ-LT-01	28,07
MD-FJ-LT-03	25,00
MD-FM-LT-01	28,55
ME-FJ-LT-01	21,59
ME-FJ-LT-02	24,20
ME-FJ-LT-03	21,68
ME-FJ-LT-04	26,06
Média	25,02



Os resultados do módulo de elasticidade tratados estão dispostos na Tabela 4, onde também foram descartados os valores espúrios que apresentaram variação superior a 15% da média. Obteve-se o valor médio de 35,12 GPa, o qual apresentou variação de 20% em relação ao valor teórico calculado de acordo com a NBR 6118:2014 (módulo de deformação tangente inicial)

Tabela 4 – Resultados do módulo de elasticidade após tratamento

CP	E (GPa)
MD-FJ-LT-01	35,56
MD-FJ-LT-02	36,07
ME-FJ-LT-01	33,97
ME-FJ-LT-02	30,13
ME-FJ-LT-04	39,86
Média (GPa)	35,12
Valor Teórico	28,01
%Variação	20%

Tensões de escoamento e ruptura dos CP's de aço

Os resultados das tensões de escoamento e ruptura são apresentados na Tabela 5. Obteve-se para a tensão de escoamento e tensão de ruptura os valores médios de 485,36 MPa e 559,54 MPa, respectivamente, valores que encontram-se dentro dos intervalos limites estabelecidos pelo fabricante do aço ensaiado. Pode-se observar também que todos os corpos-de-prova ensaiados apresentaram pouca variação dos resultados entre si.

Tabela 5 – Tensões de escoamento e ruptura dos CP's ensaiados

CP	f_y (MPa)	f_u (MPa)
CP1	500,00	562,00
CP2	520,80	560,10
CP3	485,33	545,47
CP4	493,87	542,93
CP5	482,40	560,93
CP6	468,67	551,87
CP7	472,13	558,27
CP8	459,65	594,74
Média	485,36	559,54

A Tabela 6 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal e do coeficiente de Poisson obtidos nos ensaios de cada CP. Para a análise dos resultados médios, foram desprezados os valores espúrios, os quais apresentaram variação superior a 30% da média obtida para os parâmetros analisados. Assim, obteve-se o valor médio para o módulo de elasticidade longitudinal igual a 218,99 GPa, coeficiente de Poisson de 0,305 e módulo de elasticidade transversal de 84,50 GPa. Tais valores são coerentes para o material ensaiado, de acordo com a especificação da fabricante.



Tabela 6 – Módulos de Elasticidade Longitudinal, Coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade Transversal dos CP's de aço

CP	E (GPa)	ν	G (GPa)
CP1	207,74	0,257	82,64
CP2	212,85	0,277	83,37
CP3	229,42	0,275	90,00
CP4	226,41	0,277	88,62
CP5	306,63	0,392	110,12
CP6	359,57	0,251	143,74
CP7	237,08	0,322	89,70
CP8	218,55	0,403	77,87
MÉDIA	218,99	0,305	84,50

Conclusões

Os materiais ensaiados apresentaram resistências satisfatórias, ficando estas dentro dos limites especificados no projeto, no caso do concreto, e pelo fabricante, no caso do aço. Foram obtidos resultados satisfatórios também para os valores do Módulo de Elasticidade do concreto e Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson do aço ensaiados.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 6118:2014, Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 6892:2013, Materiais metálicos – Ensaio de tração, Parte 1: Método de ensaio a temperatura ambiente, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 7680-1:2015, Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 8522:2003, Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, 2003.
- CARMONA, Curso prático de diagnóstico, reforço e proteção de edificações em concreto, ABECE, 2005.
- CÓIAS, V. – Inspeções e Ensaio na Reabilitação de Edifícios, IST Press, Outubro de 2006
- GÓMEZ, C.D – Inspección y Diagnosis, Escola Sert – Escola Prática Profissional Josep Lluís Sert, 1ªedición, Diciembre de 2002
- PACHECO, J., BILESKY, P., MORAIS, T. R., GRANDO, F. e HELENE, P., Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto, IBRACON, 2014.
- USIMINAS – Catálogo de tiras a quente. Disponível em <http://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-tiras-quente-v23-baixa.pdf>. Acesso em: 30 de nov.. 2015.