



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



Avaliação da Capacidade Resistente e da Aderência de Elementos da Marquise do Estádio do Maracanã

Regina Helena Ferreira de Souza¹; Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares²; Paulo José Barreto Teixeira³

^{1,2} *Professor, Doutor, Universidade do Estado do Rio de Janeiro*
Departamento de Estruturas e Fundações, reginahsouza@gmail.com

³ *Eng. Msc., Universidade do Estado do Rio de Janeiro*
Departamento de Estruturas e Fundações
Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5033, Bloco E, Maracanã, CEP 20550-900

Resumo

O Estádio do Maracanã foi inaugurado em 1950, com o objetivo de sediar a Copa do Mundo de Futebol daquele ano. A obra foi executada em tempo recorde para a época, o que motivou o surgimento de falhas de construção que, associadas à exposição dos agentes atmosféricos e à falta de manutenção, desencadearam vários processos de deterioração durante seus 60 anos de serviço, de forma acelerada e generalizada. Dentre as manifestações patológicas existentes destacam-se a corrosão das armaduras e suas consequências, como o deslocamento do concreto e a fissuração. A carbonatação, a desagregação do concreto, as eflorescências e os ataques biológicos também foram observados.

Diante dessas manifestações, várias intervenções no estádio foram necessárias ao longo das últimas décadas, destacando-se as reformas realizadas para receber os grandes jogos dos últimos anos. Durante a última reforma para a Copa do Mundo de Futebol FIFA 2014, um programa de inspeção atestou o estado avançado da corrosão das armaduras da marquise, com comprometimento da segurança dos espectadores sob ela, pelo desprendimento de placas de concreto de sua face inferior. Diante disso, os órgãos competentes decidiram demolir a marquise, o que possibilitou extrair amostras de trechos da laje para a realização de testes laboratoriais.

Com a demolição, foram retiradas amostras das vigas radiais, com o objetivo de avaliar a capacidade resistente de estruturas com armaduras corroídas e pequenos testemunhos da laje, de modo a avaliar a influência da corrosão na aderência de barras corroídas ao concreto.

No presente trabalho apresentam-se e discutem-se os resultados dos ensaios de flexão realizados nas amostras das vigas e de arrancamento realizados em testemunhos com armaduras inseridas, extraídos da marquise do estádio do Maracanã. Os ensaios permitiram obter resultados uniformes e condizentes com a teoria do concreto armado e a análise dos resultados indicou que o desempenho desses elementos poderia ser bem superior, caso o estado de degradação do concreto e do aço não estivesse tão elevado.

Palavra-Chave: capacidade resistente; concreto armado; aderência; corrosão; deterioração.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



Introdução

Para receber os jogos da Copa do Mundo de Futebol de 2014, a Empresa Municipal de Obras Públicas do Rio de Janeiro (EMOP) decidiu levar a cabo uma investigação do estado de conservação da estrutura da marquise do Estádio Mário Filho, internacionalmente conhecido como Estádio do Maracanã, a fim de subsidiar com mais clareza os processos de recuperação e a implantação da nova cobertura, exigência da FIFA. Para tal, foi cumprido um extenso programa de inspeção que considerou o levantamento visual e o diagnóstico por meio de testes específicos, coordenados por PAZZINI (2010). O relatório conclusivo desta investigação indicou a corrosão das armaduras como a manifestação patológica mais incidente e preocupante. Especificamente, foram verificados fragilização das armaduras por corrosão, perda de seção de aço superior à 60%, falta de aderência ao concreto, ninhos de concretagem, ruptura das barras por corrosão, pouca ou nenhuma espessura de cobrimento. A análise dos resultados desta investigação, feita por diferentes técnicos, levou à decisão da demolição da marquise de concreto, tendo em vista o alto grau de deterioração em que se encontrava esta estrutura, tanto do concreto quanto, principalmente, das armaduras, MORENO (2011).

Em continuidade a esta investigação, o Consórcio Maracanã solicitou à Faculdade de Engenharia da UERJ um estudo de partes dos elementos retirados da marquise, quando de sua demolição. Este estudo teve por finalidade a avaliação experimental de elementos ou amostras das vigas radiais e da laje da marquise do estádio do Maracanã, através da realização de ensaios laboratoriais. O interesse deste trabalho consiste na observação do desempenho de peças extraídas de uma estrutura real, com alto grau de degradação, tanto do concreto quanto das armaduras. Ressalta-se que na grande maioria dos casos, o estudo dos efeitos da corrosão das armaduras e do concreto deteriorado é normalmente feito em laboratório, através de ensaios acelerados, que não retratam com fidelidade a ação dos danos que ocorrem ao longo do tempo.

Descrição dos elementos ensaiados

Na concepção do projeto estrutural, o perímetro da estrutura do estádio foi dividido em 12 módulos circulares separados por juntas de dilatação. Ao todo os 12 módulos continham 60



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



pórticos e cada módulo possuía 6 pórticos espaçados de 15,5m, sendo dois externos, nas juntas de dilatação, e quatro internos (pórticos tipo).

A estrutura da marquise foi concebida por uma laje maciça, apoiada em vigas radiais hiperestáticas e invertidas que, por sua vez, se apoiavam nas vigas em balanço dos pórticos, denominadas por vigas gigantes. Como as vigas radiais da marquise eram muito extensas para serem ensaiadas em laboratório, foram retirados elementos destas vigas, de forma aleatória, à medida que se dava o processo de demolição da marquise. A fim de minimizar os parâmetros envolvidos, foram retirados elementos da viga onde atuavam apenas momentos positivos, ou seja, em trechos localizados entre os apoios das vigas em balanço dos pórticos.

Retirada dos elementos do estádio

A demolição da marquise, ou seja, de apenas uma parte da estrutura do estádio, com preservação dos demais elementos estruturais, exigiu um processo de grande complexidade. Para tal, foi utilizada uma treliça metálica espacial, acoplada à laje entre as vigas gigantes, durante o corte do concreto. Tão logo a placa da marquise era depositada no solo, a equipe da UERJ fazia a escolha de uma amostra no centro dos apoios, em boas condições, para ser cortada com o rompedor pneumático. Esta amostra era posteriormente recortada com serra de corte de concreto e martelete. Os elementos reduzidos eram então transportados para o Laboratório da UERJ.

Preparação dos Elementos para os Ensaios

Os elementos de viga chegavam ao Laboratório de Estruturas e Materiais da UERJ com muitas rebarbas de concreto e armaduras, além de uma capa impermeabilizante em todo o seu entorno.

Os elementos de laje ainda precisavam ser reduzidos, de modo a se garantir a proporcionalidade exigida pelo ensaio de arrancamento. Estes trabalhos eram feitos com muito cuidado para que não se danificasse ainda mais os elementos de ensaio. As barras de aço eram lisas, com diâmetro de 5mm e apresentavam, visualmente, elevado grau de oxidação. De modo geral, os modelos apresentavam uma camada de ± 5 cm de argamassa e



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



barras transversais. Como os modelos eram retangulares, buscou-se alcançar os valores de 9x7cm, de modo a manter a proporcionalidade exigida pelo ensaio.

De acordo com ensaios dos materiais existentes, a resistência à compressão do concreto era $f_c = 32\text{MPa}$ e as características do aço eram: barras de 10 mm: $A_s = 62\text{ mm}^2$; $f_{sy} = 290\text{MPa}$; $f_{su} = 380\text{ MPa}$ e barras de 5 mm: $A_s = 20\text{ mm}^2$; $f_{su} = 398\text{ MPa}$. Não foi possível obter-se o valor da tensão de escoamento das barras de 5mm, tal era o seu estado de degradação. Contrariamente ao detalhado no projeto original, as armaduras principais de tração apresentavam-se muitas vezes agrupadas em forma de feixes de barras.

Ensaio de Flexão das Vigas

Apesar de todos os cuidados na escolha das melhores amostras, o processo de demolição promovia, naturalmente, danos adicionais às peças. Além disso, como já se sabia, os elementos apresentavam danos generalizados como a fissuração do concreto devido à forte corrosão das armaduras, falhas construtivas de concretagem e de armação das barras de aço, dentre outras.

As vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos no concreto e nas barras das armaduras, que tiveram por objetivo medir as deformações das fibras comprimidas na mesa superior e as deformações das fibras tracionadas no bordo inferior das vigas. Foram também dispostos relógios analógicos e transdutores elétricos na face inferior da viga, com o objetivo de medir os deslocamentos no meio do vão. As vigas, posicionadas nos apoios do berço da máquina de ensaios, configuravam um vão com comprimento de 2,00m. O esquema de carregamento consistiu na aplicação de duas cargas concentradas nos terços do vão. Como as superfícies das vigas estavam muito irregulares, foi preciso aplicar uma camada de argamassa resistente nos locais dos apoios e dos pontos de aplicação das cargas. Todas as vigas ensaiadas apresentavam um furo localizado próximo ao meio do vão, como mostra a figura 1. Estes furos foram feitos em uma das reformas do estádio e destinava-se à drenagem das águas de chuva sobre a marquise. Nos modelos, estes furos localizavam-se próximo ao meio do vão, acima das barras de flexão e, pelo que se verificou nos ensaios, constituíram-se em um ponto frágil.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



Figura 1: Posicionamento da viga na máquina de ensaio e detalhe do furo na viga.

Foram ensaiados oito elementos de viga, sendo que cinco possuíam 7 barras na face inferior do meio do vão e três apresentavam 6 barras nesta posição. Dentre as oito vigas ensaiadas, cinco apresentaram ruptura condicionada pelo esforço cortante, com rompimento do concreto da biela comprimida da alma das vigas, esmagamento do concreto junto ao ponto de aplicação das cargas e dobramento das armaduras longitudinais no apoio. A fissura diagonal que seguiu do apoio ao ponto de aplicação da carga apresentou inclinação de 45° em relação ao eixo horizontal. Este tipo de ruptura é típico de vigas curtas, como é o caso. A figura 2 ilustra esse tipo de ruptura.



Figura 2: Fissuração de ruptura da viga M4 16/17A.

As outras tiveram ruptura por flexão com esmagamento do banço comprimido, como mostra a figura 3. As fissuras de flexão no meio do vão subiram até o topo e a fissuração diagonal não foi tão intensa quanto nas demais vigas. Tal fato ocorreu devido à fragilização verificada no furo por fissuração prévia e existência de barra longitudinal de tração rompida.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



Figura 3: Fotos da seção transversal e da fissuração de ruptura da viga M12 56/57.

Os deslocamentos médios dos elementos com 7 barras foi de 5,73mm e de 5,64mm para aqueles com 6 barras, portanto, similares. As deformações no concreto verificadas no banzo comprimido das vigas alcançaram o valor máximo de 2,65‰, portanto de acordo com a teoria do concreto armado. As deformações de tração no aço das armaduras longitudinais alcançaram o valor máximo médio de 5,56‰, sendo o maior valor obtido de 9,31‰, dentro do esperado teoricamente. As deformações do banzo tracionado da viga acompanharam o padrão de ruptura, com deslocamento vertical da região central entre as fissuras diagonais para baixo.

Na Tabela 1 estão indicados os valores das cargas últimas – P_u – obtidas nos ensaios, bem como as cargas referentes ao surgimento da fissura diagonal – P_{fiss} – responsável pelo modelo de comportamento dessas vigas.

Tabela 1: Cargas Máximas de fissuração e de ruptura das Vigas

Data do ensaio	Identificação	Nº barras long. 10mm	P_{fiss} (kN)	P_u (kN)	P_u / P_{fiss}
07/2/12	M12 - 53/54	7 barras	260	400	1,54
02/3/12	M12 - 56/57 (*)	7 barras	200	379	1,90
29/3/12	M4 - 16/17 A	7 barras	200	348	1,74
03/7/12	M2 - 5/6	7 barras	170	328	1,93
24/7/12	M11- 51/52	7 barras	240	305	1,27
17/4/12	M4 - 16/17 B (*)	6 barras	200	346	1,73
22/5/12	M5 - 21/22 (*)	6 barras	200	339	1,70
12/6/12	M1 - 59/60	6 barras	150	300	2,00

(*) ruptura por flexão com esmagamento do banzo comprimido

Todas as armaduras encontravam-se em estado avançado de corrosão, com perda variável de seção transversal. No que diz respeito ao detalhamento das armaduras, as barras



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



longitudinais não tinham qualquer tipo de amarração nos apoios. As armaduras de costela constituíam-se de barras de 8mm de diâmetro e as armaduras transversais em forma de estribos com 5mm de diâmetro, estavam espaçadas de 20cm. A altura média dos elementos de viga era de 59cm, a largura da alma de 7cm e a largura da mesa comprimida de 15cm, coincidindo com os valores constantes do projeto original. A espessura de cobrimento, quando presente, encontrava-se tão deteriorada que foi considerada nula. Trata-se de uma viga curta, sendo a relação vão/altura da viga de 3,39 e a relação a/d , ou seja, distância do apoio à carga concentrada/altura da viga, de 1,13.

Existem diversos modelos teóricos para análise de vigas curtas, nomeadamente baseados em resultados experimentais e, portanto, com valores empíricos embutidos. Como os elementos de viga testados eram elementos singulares, pois tratavam-se de uma pequena parte de uma grande viga hiperestática, muito deteriorados e danificados e onde o detalhamento das armaduras era variável, com barras longitudinais dispostas em feixe sem ancoragem, estes elementos não se ajustaram a qualquer modelo teórico existente.

Ensaio de Arrancamento nas amostras da laje

O ensaio adotado baseou-se no modelo de ensaio POT (Pull Out Test – Teste de Arrancamento Direto), normalizado pela RILEM (1983), que tem como objetivo avaliar a aderência entre barras de aço e o concreto. Este tipo de ensaio promove o arrancamento de uma barra inserida num prisma de concreto por meio de uma força de tração aplicada em uma de suas extremidades; na outra extremidade da barra lê-se os deslocamentos relativos (deslizamentos) entre o concreto e a armadura. A tensão diferencial existente na armadura faz com que se mobilizem tensões de aderência ao longo do comprimento de aderência.

Foram ensaiados e analisados 35 testemunhos, retirados de diferentes módulos em que era dividida a marquise do estádio. Todas as armaduras encontravam-se em estado avançado de corrosão, com variações na seção transversal ao longo de seu comprimento, que também nem sempre era retilíneo. Os modelos precisaram ser manipulados com bastante cuidado durante os ensaios dada a sua fragilidade.

Por serem testemunhos extraídos da laje, os modelos apresentavam nenhuma, uma ou duas barras horizontais e alguns modelos ainda apresentavam uma barra adicional vertical. A ruptura dava-se pelo rompimento do aço, como mostram as fotos da figura 4, por



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



fendilhamento do concreto, como mostram as fotos da figura 5, por arrancamento da barra, conforme figura 6, ou por arrancamento da barra seguido de fendilhamento do concreto, conforme figura 7.



Figura 4: Ruptura do aço ao longo da barra ou no interior do modelo.



Figura 5: Ruptura por fendilhamento do concreto.



Figura 6: Ruptura por arrancamento da barra.



Figura 7: Ruptura por arrancamento / fendilhamento.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



Em elementos sãos, a aderência das barras lisas é assegurada inicialmente pelas adesões química e física (devida à rugosidade microscópica da superfície do aço), e depois pelo atrito (micro-fissuração ao redor da barra); os deslocamentos são pequenos, dependendo da ação ou não de confinamento. Nos ensaios dos modelos da laje do estádio do Maracanã notou-se que as barras de aço, embora fossem originalmente lisas, resistiram ao arrancamento pela ação da adesão física e do atrito provenientes das camadas de óxidos de ferro depositadas pela oxidação da barra na interface com o concreto. Por outro lado, o arrancamento da barra na maioria dos casos foi impedido pelas rupturas do aço e do concreto e pelo fendilhamento do concreto para pequeníssimos deslizamentos.

Dentre os tipos de ruptura, quatro foram por arrancamento da barra, com grandes deslizamentos, sete por rompimento do concreto, doze por rompimento do aço e doze por arrancamento seguido por fendilhamento do concreto, com pequenos deslizamentos. Se o concreto e o aço estivessem íntegros, as barras lisas deslizariam até o seu total arrancamento, com maiores ou menores valores de deslizamentos, dependendo do confinamento existente. Assim, os resultados obtidos nos ensaios indicaram que a maioria dos modelos rompeu por fragilidade do concreto e do aço provocadas pela deterioração dos mesmos.

O confinamento mostrou-se um fator positivo nos modelos que tiveram ruptura do aço, indiferente para os casos de ruptura por arrancamento/fendilhamento e insuficiente para evitar a ruptura do concreto. Todos os modelos que romperam por arrancamento não tinham barras de confinamento.

Considerações Finais e Conclusões

No que diz respeito aos ensaios de vigas, o trabalho realizado pelo Laboratório de Estruturas e Materiais da Faculdade de Engenharia da UERJ permitiu obter resultados uniformes e condizentes com a teoria do concreto armado. Os valores lidos de deslocamentos e deformações no concreto e nas armaduras apresentaram comportamento semelhante entre si, atestando a veracidade dos resultados. Tanto a seleção das melhores amostras como o critério adotado para o local de retirada das amostras, tendo em vista o esquema de carregamento a ser aplicado nos ensaios de flexão, mostraram-se adequados para a análise desses elementos de viga muito curtos. Assim, a análise dos resultados dos ensaios indicou



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

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

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



que o desempenho desses elementos poderia ser bem superior, caso o estado de degradação dos mesmos não estivesse tão elevado.

No que diz respeito aos ensaios de arrancamento das amostras da laje, os modelos apresentaram-se muito fragilizados pela oxidação do aço e deterioração do concreto e as barras de aço apresentavam variações dimensionais da seção transversal ao longo de seu comprimento. A aderência foi fortemente comprometida pelo estado elevado de degradação do concreto, nomeadamente o do cobrimento das barras, que promoveu a maioria dos tipos de ruptura por arrancamento/fendilhamento do concreto e pela fragilização do aço das armaduras, levando à ruptura do aço, inclusive no interior dos modelos.

Referências

- FEDERATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **FIB Bulletin 10**; Bond of Reinforcement in Concrete, State-of-the-art Report, 2000.
- JORDY, J.C.; Souza, V.C.M.; Mendes, L.C. **Recuperação Estrutural do Estádio do Maracanã**. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infra. Civil. Vol. 7, 2006.
- LEC-Laboratório de Engenharia Civil da UERJ. **Relatório de ensaios dos aços**, 2012.
- MORENO J.I. **Estudo do Maracanã**. EMOP, Rio de Janeiro, 2011.
- PAZZINI F.E. **Relatório Técnico Maracanã 2014/01-2010**- Levantamento e diagnóstico das manifestações patológicas das estruturas de concreto do Maracanã: cobertura e pilares, EMOP, Rio de Janeiro 2010.
- RILEM/CEB/FIP. **Bond Test for Reinforcement Steel**: 1. Beam test (RC5), 2. Pull-Out Test (RC6), CEB Manual on Concrete Reinforcement Technology, 1983.
- VASCONCELOS, A.C. **O Concreto no Brasil: obras especiais**. Ed. Ibracon, Volume IV, São Paulo, 2011.