

Caracterização das cascas em alvenaria do Theatro Municipal do Rio de Janeiro

Characterization of masonry shells of the Theatro Municipal do Rio de Janeiro

Danielli Cristina Borelli Cintra
Emil de Souza Sánchez Filho
Deane de Mesquita Roehl

Resumo

A caracterização e avaliação da integridade estrutural são desafios para a análise e preservação de edifícios históricos devido à escassez de registros construtivos, diversidade de materiais, restrições de acesso, contato e extração de amostras. Técnicas não destrutivas foram aplicadas com o objetivo de determinar as propriedades geométricas, construtivas e mecânicas das cascas em alvenaria de tijolos do Theatro Municipal do Rio de Janeiro, edifício construído no início do século XX. Com pinturas de artistas renomados em seu intradorso, as cascas estiveram em risco de colapso na década de 1970 devido a recalques diferenciais e umidade, comprometendo suas pinturas, por isso as cascas foram reforçadas com concreto projetado. Apresentam-se os resultados e discussões do programa experimental realizado com as seguintes técnicas: fotogrametria, termografia infravermelha, pacometria, esclerometria, velocidade de pulso ultrassônico, *Ground Penetrating Radar* (GPR) e macaco plano duplo. Os ensaios utilizados de maneira combinada, permitiram alcançar os propósitos almejados.

Abstract

The characterization and evaluation of structural integrity are challenges for the analysis and preservation of historical buildings due to the shortage of constructive records, diversity of materials, restrictions of access, contact and sample extraction. Non-destructive techniques were applied with the purpose of determining the geometric, mechanical and constructive properties of the brick masonry shells of the Theatro Municipal do Rio de Janeiro, a building constructed at the beginning of the 20th century, of high historical and cultural value. With paintings by renowned artists in their intrados, the shells suffered a risk of collapse in the 1970s due to differential settlement and moisture, compromising their paintings, so the shells were strengthened with projected concrete. The authors present the results and discussions of the experimental program performed with the following techniques: photogrammetry, infrared thermography, pacometry, sclerometry, ultrasonic pulse velocity, Ground Penetrating Radar (GPR) and double flat jack. The tests used in a combined way, allowed to reach the study the desired goals.

Palavras-chave: Cascas / Alvenaria / Ensaios não destrutivos / Theatro Municipal do Rio de Janeiro

Keywords: Shells / Masonry / Non-destructive testing / Theatro Municipal do Rio de Janeiro

Danielli Cristina Borelli Cintra

Doutoranda do Departamento de Engenharia Civil
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Brasil
daniellicbc@gmail.com

Emil de Souza Sánchez Filho

Professor Titular
Universidade Federal Fluminense
Rio de Janeiro, Brasil
emilsanchez@uol.com.br

Deane de Mesquita Roehl

Professora do Departamento de Engenharia Civil
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Brasil
droehl@puc-rio.br

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

CINTRA, D. [et al.] – Caracterização das cascas em alvenaria do Theatro Municipal do Rio de Janeiro. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 10. ISSN 2183-8488. (julho 2019) 39-50.

1 Introdução

A preservação de edifícios de patrimônio histórico tem um caráter multidisciplinar e a análise estrutural pode ser útil para estimar o estado de conservação da construção, assim como para avaliar a eficiência de técnicas de intervenção, como recomenda o Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS) [1]. Nesse contexto a caracterização e avaliação da integridade dos elementos estruturais se torna fundamental, embora seja uma tarefa geralmente complexa devido à escassez de registros construtivos e sobre o histórico de intervenções, além de existirem restrições de acesso, contato e especialmente de extração de testemunhos.



Figura 1 (a) Foto da construção por Augusto Malta (1906); (b) fachada atual

Fonte: O Theatro Municipal – História. In: <http://www.theatromunicipal.rj.gov.br/sobre/historia/>, acesso: 10/12/2016

Os ensaios não destrutivos são recursos investigativos que não causam danos permanentes ao elemento ensaiado, não provocando perda da sua capacidade resistente. Esses ensaios são de grande valia para o estudo de patrimônio histórico, o qual não pode ser submetido a alterações que comprometam sua autenticidade.

Sem testemunhos e sem conhecer as propriedades do material e dimensões dos elementos, a precisão das informações obtidas nos ensaios não destrutivos fica consideravelmente comprometida. Porém, a combinação entre vários ensaios, os cuidados na execução dos mesmos e o conhecimento dos fatores que influenciam nos resultados podem facilitar a interpretação dos dados e validar a estimativa das informações desejadas [2,3].

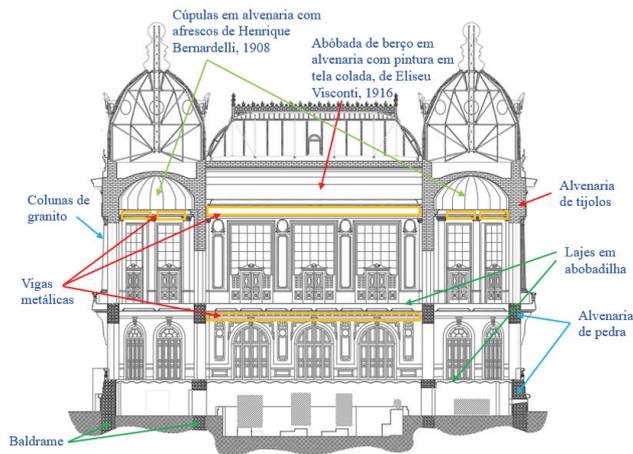


Figura 2 Corte transversal da área nobre do TMRJ
Fonte: adaptado a partir de desenho arquitetônico [9]

Uma das maiores referências do patrimônio material brasileiro, o Theatro Municipal do Rio de Janeiro (TMRJ) exerce importante função para a cultura carioca e nacional brasileira. Foi construído entre 1905 e 1909 (Figura 1), simultaneamente a outros edifícios monumentais do entorno como a Biblioteca Nacional, Museu Nacional de Belas Artes e a antiga Caixa de Amortização, que juntos são tombados pelo Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) como conjunto arquitetônico da Avenida Central, desde 1973 [4]. Além desses edifícios destacam-se também o Clube Naval e o Palácio Monroe (demolido em 1976), construídos na mesma época. O TMRJ também é tombado pelo Instituto Estadual do Patrimônio Cultural (Inepac), desde 1972 [5]. Cintra *et al.* (2017) descrevem o sistema de construção do edifício do TMRJ e a anamnese das intervenções estruturais ocorridas ao longo dos anos [6].

Com pinturas de artistas renomados como Eliseu Visconti e Henrique Bernardelli no intradorso as cascas em alvenaria de tijolos do TMRJ estiveram em risco de colapso na década de 1970 devido a recalques diferenciais e umidade, comprometendo suas pinturas, segundo relatórios da época [7,8], tendo sido reforçadas com concreto projetado. A grande parte dos elementos da estrutura (Figura 2) tem propriedades desconhecidas e está oculta pela decoração característica do estilo arquitetônico eclético, comum aos edifícios da época.

Para conferir e complementar informações de fontes documentais, o objetivo deste trabalho é relatar como foram obtidas as propriedades geométricas, mecânicas e construtivas da estrutura por meio de uma campanha de ensaios in situ, para serem utilizados em etapa posterior de análise numérica da estrutura visando investigar as causas dos

danos da década de 1970, e avaliar a eficiência das intervenções já realizadas. Apresentam-se a metodologia, as limitações, análise de dados e discussões das técnicas aplicadas: fotogrametria, termografia infravermelha, pacometria, esclerometria, ultrassom, macaco plano duplo e Ground Penetrating Radar (GPR).

2 Cascas em alvenaria do TMRJ

2.1 Descrição

No pavimento superior do TMRJ, próximo ao centro da fachada principal, Figura 3, existe o foyer, um salão coberto por uma casca cilíndrica de berço, denominada abóbada do foyer, com dimensões de 6,83 m x 17,48 m e flecha de 2,60 m, construída em alvenaria de dupla camada de tijolos cerâmicos assentados com argamassa cimentícia. As duas rotundas laterais são cobertas por cascas esféricas, denominadas cúpulas, com diâmetro de 6,28 m, flecha de 2,75 m e foram construídas em alvenaria de tijolos cerâmicos assentados e revestidos com argamassa de cimento e cal [8].

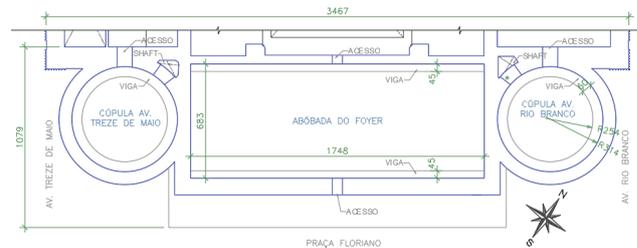


Figura 3 Planta da parte frontal superior do TMRJ

2.2 Anamnese

O tempo, os eventos festivos, vandalismo, infiltrações no telhado, as obras no entorno, como a construção do metrô nas proximidades, entre outras ocorrências, danificaram esse edifício. Na década de 1970 as cascas encontravam-se em risco de desabamento devido às fissuras e infiltrações provenientes da cobertura, comprometendo as pinturas do intradorso [7].

Não foram encontradas referências a projeto de reforço, porém, consta em relatório da época que o professor José Luiz Cardoso, consultado para o caso, partiu da premissa de que não tendo ocorrido ruína a estrutura apresentava um índice de segurança à ruptura ≥ 1 e qualquer solução imediata, ainda que parcial, acrescentaria uma segurança adicional. Em 1976 as três cascas foram reforçadas com concreto projetado armado e toda a intervenção foi executada em três dias, sem pisar sobre as cascas, sem escoramento para não danificar as pinturas no intradorso e consistiu nas seguintes etapas [8]:

- etapa 1 – construção de vigas laterais e uma casca sobreposta em concreto projetado armado, a fim de suportar parte do peso da casca original, conforme Figura 4a. Na concretagem, deu-se prioridade à criação de arcos sobre as maiores fissuras transversais (Figura 4b);

- b) etapa 2 – injeção de epóxi nas fissuras para restabelecer o monolitismo das cascas, por meio de purgadores plásticos, conforme Figura 4b;
- c) etapa 3 – ancoragem de conectores metálicos imersos em furos preenchidos com epóxi, a fim de promover a aderência entre a casca original em alvenaria de tijolos e a nova em concreto, conforme Figura 4c e Figura 4d.

São objetos deste estudo a abóbada do foyer e a cúpula da Av. Rio Branco, a qual encontra-se coberta por uma manta de impermeabilização que, embora deteriorada e desprendendo da casca em alguns trechos, não pôde ser removida, tendo sido os ensaios realizados sobre a manta. A cúpula da Av. Treze de Maio não foi estudada pelos ensaios de contato, devido à impossibilidade de acesso no extradorso, por isso suas características são consideradas similares às da Av. Rio Branco.

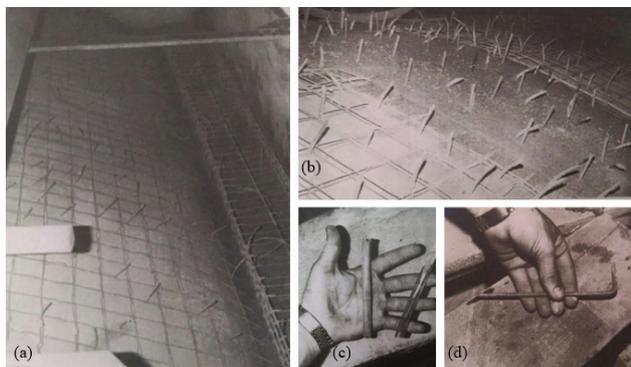


Figura 4 Fotos do reforço das cascas na década de 1970 [8]

3 Programa experimental

3.1 Fotogrametria

A técnica de fotogrametria de curta distância foi aplicada com objetivo de obter a representação gráfica dos elementos estudados e indicações de danos na estrutura e pinturas. Todo levantamento de fotogrametria foi realizado pelo intradorso das cascas, a partir do nível do piso das salas para o registro das imagens globais e sobre andaime metálico para as imagens locais. Foi utilizada uma câmera com resolução nominal de 16 megapixels, um conjunto de lentes em formato Full-frame tradicional e tripé calibrado com nível bolha. Na abóbada foram tiradas 1775 fotos com distância focal de 150 mm. Nas cúpulas da Av. Treze de Maio e da Av. Rio Branco foram tiradas, respectivamente, 475 fotos e 250 fotos, ambas numa distância focal de 100 mm.

No processamento das imagens de fotogrametria foram utilizados os softwares Visual Science from Motion, versão V0.5.26, e Cloud Compare, versão 2.10. O software *Agisoft Photoscan*, versão 1.3.1, foi utilizado para a restituição fotogramétrica, correção digital e montagem do material gráfico gerado no levantamento in situ. O agrupamento das imagens foi realizado a partir de pontos de referência na pintura e em elementos da estrutura, medidos com medidor eletrônico de precisão de $\pm 1,5$ mm.

As nuvens de pontos geradas têm uma densidade de 1 pixel por mm, resolução de 9360×9360 pixels para as cúpulas e de 44560×17000 pixels para a abóbada do foyer, com precisão de $\pm 0,25$ mm (Figura 5a). D'Amélio e Brutto (2009) obtiveram precisão de $\pm 0,1$ mm para ensaios realizados a uma distância de 1,2 m, porém, com tela de superfície plana [10].

O topo das paredes das salas em que foram realizados os estudos é decorado por sancas em gesso, que prejudicaram o levantamento das imagens na base das cascas, produzindo sombra, mesmo sobre andaimes. A fotogrametria se mostrou eficaz como ferramenta para reprodução digital e tridimensional da superfície dos elementos, fornecendo alta definição na representação e registro gráficos, além de precisão nos dados para a detecção de desníveis e de discontinuidades na superfície de elementos com formas complexas. Destaca-se o potencial da fotogrametria como ferramenta de monitoramento estrutural de cascas por meio da implementação de metodologia de comparação de deslocamentos entre nuvens de pontos, conforme sugerem Acikgoz *et al.* [11]. A alta definição das ortofotos permite o registro de obras de artes (Figura 5b-d).

3.2 Termografia infravermelha

A técnica de termografia infravermelha foi empregada com o objetivo de identificar características construtivas, padrão de fissuração e intervenções realizadas nas cascas.

Todo levantamento foi realizado no intradorso das cascas, utilizando a técnica de termografia infravermelha passiva, isto é, considerou-se a excitação térmica natural por insolação no telhado, no início de uma tarde de verão. A técnica ativa foi descartada, pois requer um aquecimento artificial por meio de uma fonte de calor, o que pode acelerar o processo de degradação da superfície da estrutura e das pinturas, embora possa fornecer informações mais detalhadas, de acordo com Cortizo [12]. Conforme previsto na literatura [3,13], as imagens termográficas do extradorso das cascas em concreto projetado armado não apresentaram contraste de temperatura entre seus materiais componentes por isso não foram consideradas no levantamento.

Foram utilizados três tipos de câmeras infravermelhas: (a) FLIR T1020, com sensor de 1024×768 pixels, lente FOL 36 mm e com campo de visão de $28^\circ \times 21^\circ$; (b) FLIR SC620, com sensor de 640×480 pixels, lente FOL 38 mm; (c) FLIR C2, com sensor de 80×60 pixels, lente FOL 2 mm. A Tabela 1 apresenta os parâmetros gerais do levantamento. As Figura 6 e 7 apresentam imagens infravermelhas da cúpula da Av. Rio Branco, a da Av. Treze de Maio e da abóbada do foyer, respectivamente.

Tabela 1 Parâmetros do ensaio de termografia infravermelha

Parâmetros	Valores
Emissividade térmica	0,95
Distância média de observação	9,5 m
Temperatura atmosférica	28,5 °C
Humidade relativa do ar	59%

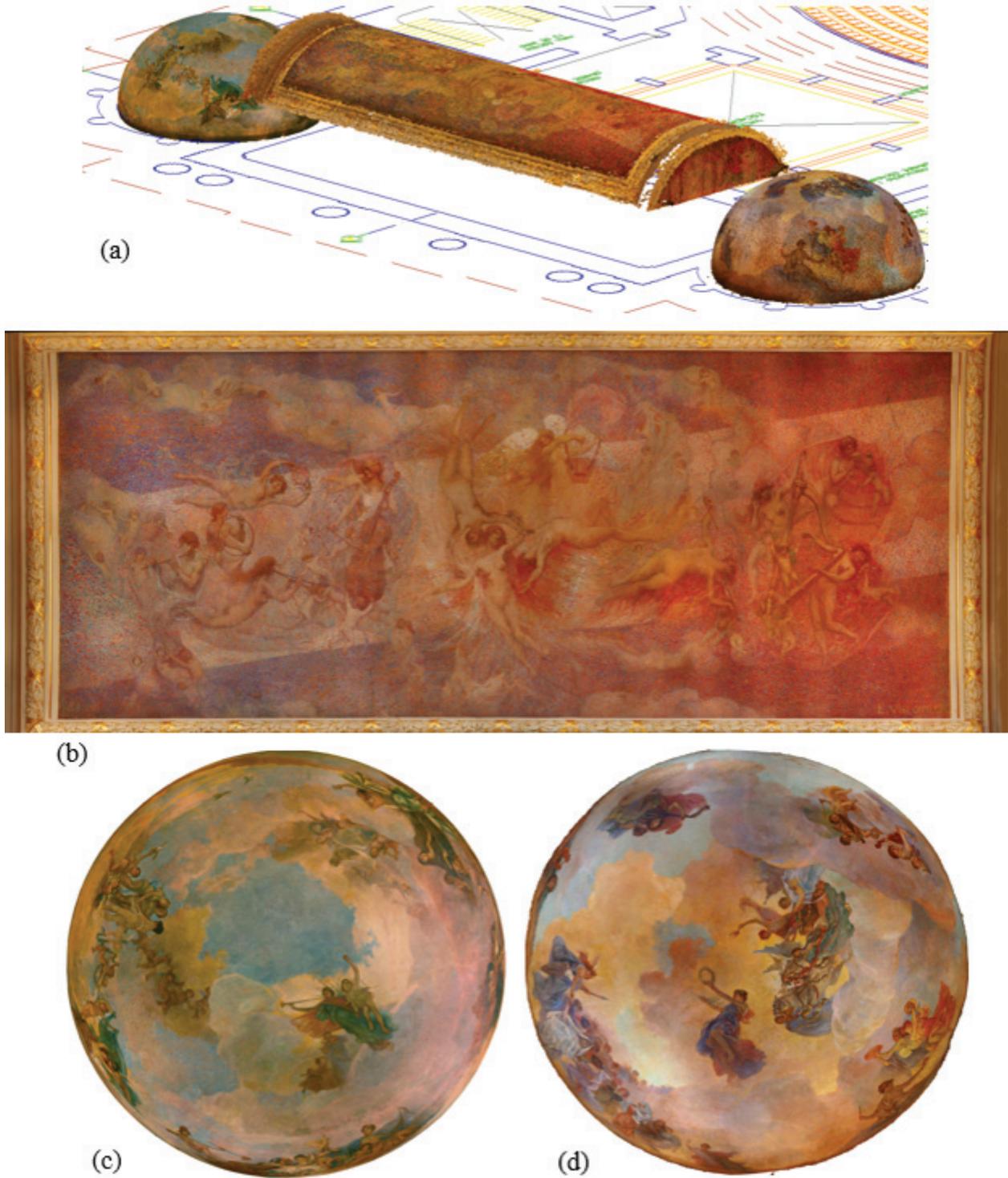


Figura 5 Intradorso das cascas: (a) nuvem de pontos; (b) ortofoto da abóbada do foyer; (c) cúpula da Av. Treze de Maio; (d) cúpula da Av. Rio Branco
Imagens: produção de Adolfo B. Ibáñez para esta pesquisa



Figura 6 Imagem infravermelha da cúpula da Av. Rio Branco
 Notas: (a) Dimensões dos tijolos: Li1 – 0,145 m; Li2 – 0,073 m; Li3 – 0,142 m. (b) Alvenaria regular de tijolos com dimensões prováveis de 15 cm X 7 cm em posição de topo, dispostos em fiadas perpendiculares à curva da casca. (c) Seto vermelha – fissura (já tratada) no sentido dos meridianos, passando pelo vértice.

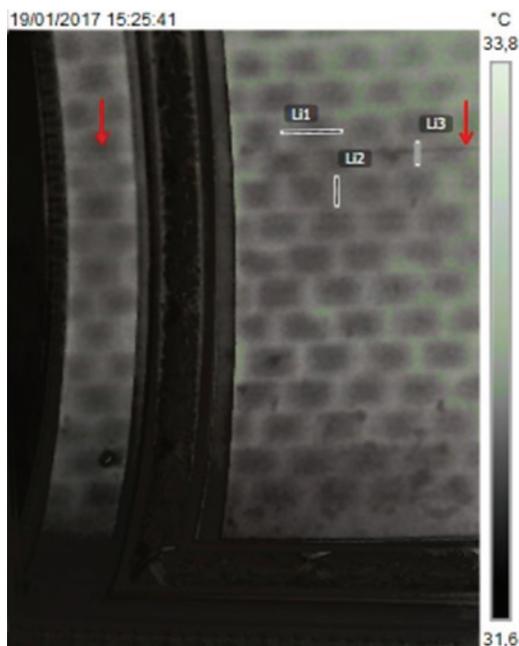


Figura 7 Imagem infravermelha da abóbada do foyer
 Notas: (a) Dimensões dos tijolos: Li1 – 0,424 m; Li2 – 0,203 m; Li3 – 0,156 m. (b) Alvenaria regular de tijolos com dimensões de 40 cm X 20 cm. Fiada do vértice (Li3) cerca de 5 cm mais estreita do que as demais. (c) Pontos escuros provavelmente são incertos metálicos usados no reforço de 1976. (d) Seto vermelha: fissura contínua (já tratada) no vértice da casca.

Na análise das imagens de infravermelho foi utilizado o *software FLIR Tools+*, que se mostrou versátil pelas opções de ferramentas para edição de imagens e medições aceitáveis, considerando-se uma tolerância de ± 3 cm para a distância de 9,5 m entre a lente

e o vértice dos elementos estruturais estudados. As dimensões dos tijolos são compatíveis com as obtidas pelo ensaio de GPR. Destaca-se a alta resolução das imagens obtidas com o recurso UltraMax das câmeras de infravermelho, que facilitou a visualização de descontinuidades.

A termografia infravermelha passiva mostrou-se eficaz na caracterização de descontinuidades na alvenaria do intradorso das cascas, em que houve sensibilidade de contraste de temperatura entre os materiais. A técnica permitiu detectar a incidência de umidade na alvenaria, a paginação da alvenaria de tijolos, fissuras já tratadas, além dos insertos metálicos utilizados para reforço em 1976 e outros detalhes construtivos, sendo uma ferramenta útil para o trabalho de inspeção e avaliação qualitativa de alvenarias com revestimento em argamassa.

As técnicas de termografia infravermelha e de fotogrametria foram utilizadas na elaboração do mapa de danos, Figura 8, com o objetivo de ser utilizado no planejamento e controle de intervenções futuras, complementando e confirmando informações encontradas em pesquisa documental. A fotogrametria permitiu a correção de distorções apresentadas nas imagens infravermelhas e nas fotografias, provocadas pelas grandes dimensões e pela curvatura da estrutura, promovendo maior precisão no posicionamento e definição do formato das fissuras.

Na abóbada observa-se uma fissura longitudinal praticamente contínua no vértice do intradorso. As fissuras transversais ocorreram no centro e nos terços médios, com maior incidência de ramificações no lado oposto à fachada do edifício. Ocorreu uma fissura diagonal próxima ao canto da fachada da Av. Rio Branco e outra próxima ao primeiro terço médio.

As fissuras mais pronunciadas nas cúpulas se apresentam na posição diagonal, de maneira simétrica. A fissura da cúpula da Av. Rio Branco é contínua e passa pelo vértice, enquanto na cúpula da Av. Treze de Maio são observadas fissuras com ramificações, posicionadas abaixo do vértice. Destaca-se que as fissuras que foram detectadas se encontram tratadas pelas intervenções relatadas na anamnese. Não há registros sobre a ocorrência de fissuras no extradorso das cúpulas e abóbada.

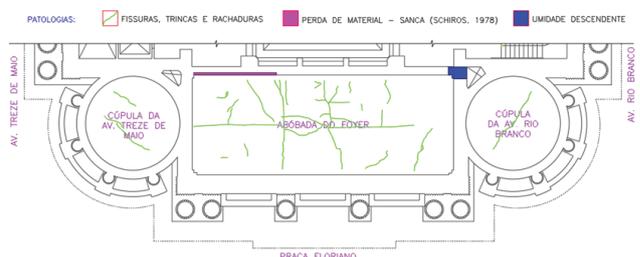


Figura 8 Mapa de danos do intradorso das cascas

3.3 Pacometria

Ensaio de pacometria foram realizados no extradorso da abóbada do foyer e nas suas vigas laterais com o objetivo de mapear as barras de aço no concreto para a realização de ensaios subsequentes.

Foram determinados os cobrimentos de armadura, espaçamentos e, em alguns locais, o diâmetro das barras.

Os equipamentos utilizados foram os modelos Profoscope e Profometer da Proceq, que são calibrados para detectar a posição de vergalhões de aço a uma profundidade máxima de 18 cm de medição no concreto [14]. Para evitar o comprometimento das medições devido à rugosidade do concreto projetado foi utilizado um tapete de acetato-vinilo de etileno (EVA) de 3 mm de espessura, a fim de minimizar problemas de contato do equipamento com a superfície da casca.

Confirmando informações do relatório da época do reforço (Figura 4a), o espaçamento médio de 9 cm foi medido entre vergalhões da malha metálica da casca (Figura 9a), indicando uma abertura de malha considerada insuficiente para determinar o diâmetro dos vergalhões. A presença de insertos metálicos também foi um ruído para tal medição. Devido à rugosidade da casca e uso do tapete de EVA, foi usada uma compensação de cerca de 0,5 cm e considerada a tolerância de ± 2 mm na determinação de cobrimento das barras, que foi estimado em 2,5 cm, o que sugere uma espessura mínima de camada de concreto projetado com cerca de 3 cm, sendo que a tela soldada tem vergalhões de $\varnothing 3$ mm, segundo o relatório da época da intervenção [8]. Os insertos metálicos foram detectados a cada 20 cm, com cobrimento médio de 1 cm, não sendo possível confirmar seu diâmetro por estarem paralelos à propagação de onda do equipamento, prejudicando a medição.

Na face superior das vigas laterais foram detectadas três barras longitudinais de $\varnothing 18$ mm, com cobrimento de 3,5 cm e estribos de $\varnothing 8$ mm com espaçamento médio de 10,8 cm e cobrimento de 2,5 cm.

A pacometria também foi empregada no intradorso, com uso de andaimes, confirmando a presença de vigas metálicas no apoio das cascas, utilizadas na construção para vencer vãos entre 2 e 3,5 m, como indicado na Figura 2. Também foram detectadas as vigas metálicas que compõem as lajes em abobadilhas com vão de 6,9 m e espaçamento de 1 m.

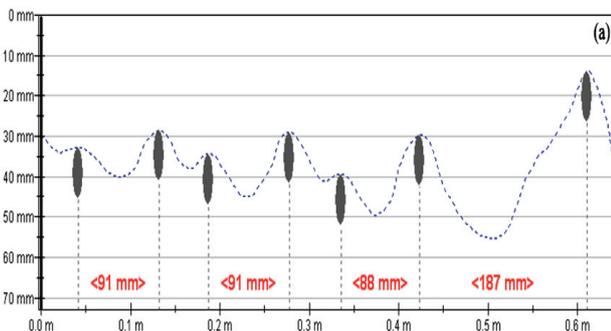


Figura 9 Posição das barras na abóbada do foyer

3.4 Esclerometria

A esclerometria foi utilizada com o objetivo de estimar a dureza superficial do concreto das vigas e cascas e das paredes em alvenaria de tijolos e pedras, a fim de obter elementos para a avaliação

da qualidade dos materiais, por meio da medição do índice esclerométrico (IE).

O esclerômetro utilizado foi o modelo SilverSchmidt PC tipo L e N da Proceq, que é baseado num valor de coeficiente de rebote que independe do ângulo formado pela direção do impacto do martelo com a vertical, o que é bem apropriado para o caso de superfícies curvas. Foram utilizados êmbolo convencional e do tipo cogumelo, o qual é recomendado pelo fabricante para resistências entre 5 e 30 MPa e elementos com espessura de até 10 cm [15].

As medições foram realizadas ao longo das paredes em alvenaria de tijolos e de pedra, da viga de concreto e da abóbada, sempre coletando 16 valores individuais de IE, distribuídos em malha com distância de 3 a 4 cm, num total de 21 posições (Figura 10). Na casca do foyer e na viga as medições foram desviadas das armaduras localizadas no ensaio de pacometria. A rugosidade do concreto projetado da casca dificultou a execução do ensaio, sendo que foi realizado apenas nos locais em que a superfície apresentou menor irregularidade.

Os valores do IE médio efetivo foram obtidos por meio da média das 16 medições correspondentes a cada área de ensaio, desprezando-se todo IE individual que estivesse afastado em mais de 10% do valor médio, com no mínimo de 5 valores individuais, conforme prescreve a NBR 7584 [16].

O software Hammerlink foi utilizado para a avaliação dos resultados (Figura 11). A parede lateral da abóbada do foyer apresentou os maiores valores de IE, enquanto a parede posterior da cúpula da Av. Treze de Maio, os mais baixos. Em cada elemento da estrutura observa-se uma similaridade entre os valores de IE médio efetivo obtidos com o mesmo tipo de êmbolo, demonstrando a uniformidade da qualidade e resistência dos materiais que compõem um mesmo elemento. As medições feitas com êmbolo cogumelo foram em média 27% menores do que as obtidas com o êmbolo convencional em locais próximos.

Diante da impossibilidade da retirada de testemunhos para ensaios destrutivos, os índices esclerométricos não puderam ser correlacionados com propriedades mecânicas dos materiais. Assim, a avaliação do ensaio foi apenas no âmbito qualitativo, comprovando a homogeneidade do comportamento dos materiais ao longo de cada elemento estudado.

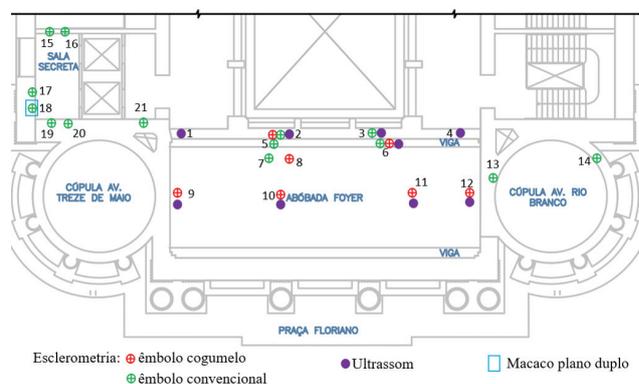


Figura 10 Planta de localização dos testes

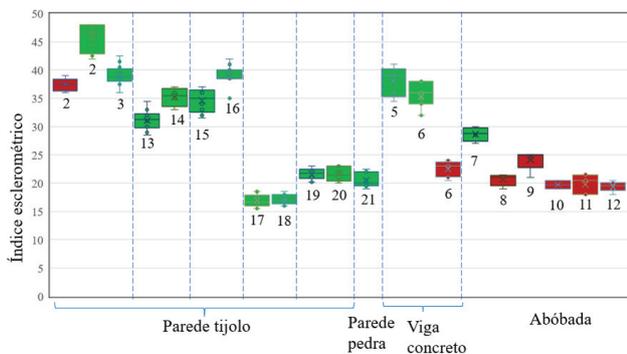


Figura 11 Variação do índice esclerométrico dos elementos e suas posições

3.5 Ultrassom

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica foi aplicado com o objetivo de avaliar a qualidade dos materiais das cascas e das paredes em alvenaria de tijolos maciços e estimar suas propriedades mecânicas.

Utilizou-se o equipamento Pundit PL-200 com transdutores de 54 kHz de frequência de onda acústica longitudinal, com diâmetro de 50 mm. O procedimento adotado foi o da norma NBR 8802 [17] e foi empregada a transmissão indireta de onda entre os transdutores, isto é, estes foram posicionados na mesma face dos elementos estudados. O ensaio foi empregado no extradorso da abóbada, viga de concreto e na parede lateral da abóbada em alvenaria de tijolos revestida com cerca de 3 mm de reboco, nas posições indicadas na Figura 10, coletando-se de 4 a 6 velocidades sequenciais em cada posição.

O software PL-Link foi utilizado para análise dos resultados. As velocidades médias obtidas para as ondas longitudinais (V_p) e superficiais (V_r) pelo método de transmissão indireta de onda entre os transdutores são apresentadas na Figura 12 para a análise qualitativa. A parede em alvenaria de tijolos maciços apresentou os menores valores de velocidade (Figura 13a e Figura 13b), provavelmente devido à maior porosidade do material e à presença de juntas de argamassa, porém, seus resultados tiveram pequena variação, indicando homogeneidade nas características dos materiais ao longo do elemento. A regularização por lixamento da fina camada de reboco foi fundamental para o acoplamento do equipamento na superfície da parede, sendo que o efeito do reboco foi considerado desprezível nos resultados.

A viga em concreto armado apresentou as maiores velocidades de onda pela presença de materiais com maior densidade e menor incidência de vazios do que os demais elementos. A casca apresentou velocidades intermediárias entre a alvenaria de tijolos e o concreto armado, indicando que as medições incorporaram esses dois tipos de materiais que são componentes da casca. As extremidades da casca apresentam materiais com características similares, porém, observam-se velocidades menores na posição 10, que corresponde à região central da abóbada, possivelmente pela presença de vazios ou de fissuras que, embora já tratadas, podem ter recebido a injeção de

argamassa de menor densidade do que a alvenaria. A irregularidade na superfície da casca dificultou o contato dos transdutores na posição 11 e seus dados foram descartados da análise.

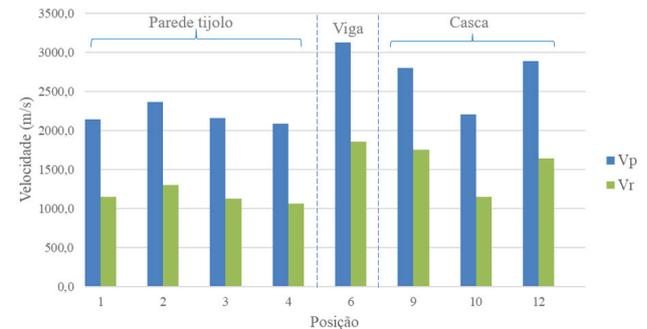


Figura 12 Velocidade média das ondas longitudinais (V_p) e superficiais (V_r)

A Figura 13c apresenta a relação entre a velocidade das ondas longitudinais (P), superficiais (R) e de cisalhamento (S) em função do coeficiente de Poisson para meios homogêneos, elásticos e semi-infinitos. Embora sejam diferentes, as velocidades das ondas superficiais (V_r) e de cisalhamento (V_s) são muito próximas, fazendo com que a relação V_r/V_s seja próxima da unidade. Assim, considerando a razão V_p/V_r no gráfico da Figura 13c, os valores obtidos nos ensaios se encontram dentro dos limites esperados para o coeficiente de Poisson dos materiais, correspondendo a cerca de 0,2 para o concreto da viga, um valor entre 0,25 e 0,30 para a alvenaria de tijolos da parede e cerca de 0,25 para o material da casca, composta de tijolos e concreto armado.

A Tabela 2 apresenta o módulo de elasticidade dinâmico estimado a partir da velocidade de ondas longitudinais, utilizando a teoria da elasticidade, apesar de não se tratar de materiais homogêneos, isotrópicos e elásticos, porém, sugerido por Miranda (2011) na falta de relações mais adequadas [18]. Na literatura encontram-se variações de até $\pm 20\%$ entre os módulos de elasticidade dinâmicos E_d e estáticos E_c [18,19].

$$E_d = \frac{\rho V_p^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (1)$$

Tabela 2 Módulos de elasticidade dinâmicos E_d e estáticos E_c estimados

Elemento	ρ (kgf/m ³)	V_p médio (m/s)	V_p/V_r	ν	E_d (MPa)	$E_c = \pm 20\% E_d$ (MPa)
Parede tijolos	1800	2191	1,89	0,27	6914	5531 a 8297
Viga concreto	2500	3131	1,68	0,20	19607	15685 a 23528
Abóbada	2000	2632	1,76	0,25	11084	8867 a 13300

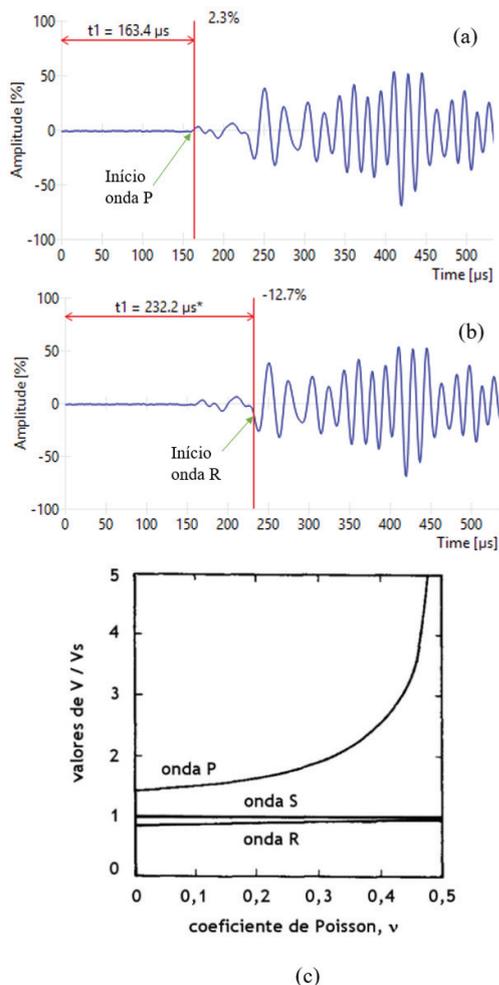


Figura 13 Parâmetros da velocidade da onda longitudinal (a) e superficial (b) na posição 4 da alvenaria de tijolos maciços; (c) relações entre coeficiente de Poisson e velocidades de ondas longitudinais (P), superficiais (R) e de cisalhamento (S) [18].

3.6 Macaco plano duplo

O ensaio de macaco plano duplo monotônico foi realizado na parede em alvenaria de tijolos como indicado na Figura 10, em parceria com a Universidade Federal de São Carlos. O objetivo do ensaio foi estimar o módulo de elasticidade e a tensão admissível à compressão da alvenaria, assumindo que as paredes ensaiadas sejam representativas da estrutura da parte frontal do TMRJ.

A calibração dos dois macacos planos com capacidade de tensão de 6,9 MPa e dimensões de 10 × 40,6 cm² foi realizada segundo as prescrições da norma ASTM C1197-14 [20]. Os fatores obtidos para correlação entre pressão interna e externa dos macacos constam na Tabela 3. Os rasgos na parede foram executados com furadeira e esmirilhadeira. Foram utilizados quatro relógios comparadores na vertical e um na horizontal, todos com precisão de 0,005 mm

(Figura 14a). A primeira fissura foi observada no canto à direita do macaco inferior correspondente à tensão estimada na parede de 4,8 MPa, e em seguida outras pequenas fissuras surgiram na mesma região. O ensaio foi interrompido por limitação da capacidade de pressão medida no equipamento em 8 MPa, atingindo uma tensão de compressão na parede correspondente a 6,0 MPa. Não foi encontrado um valor de referência para comparar a resistência à compressão desse tipo de alvenaria no Rio de Janeiro, porém, os resultados são similares aos relatados na literatura para edifícios europeus no início do século XX [21].

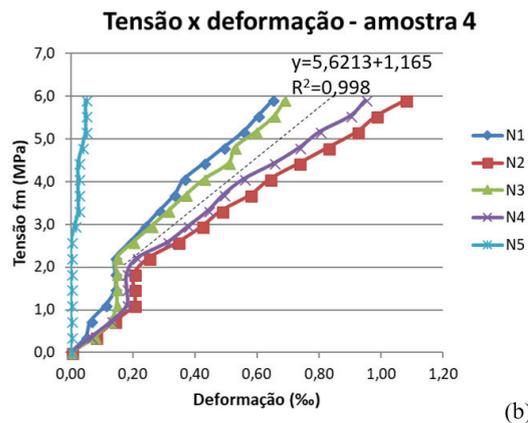
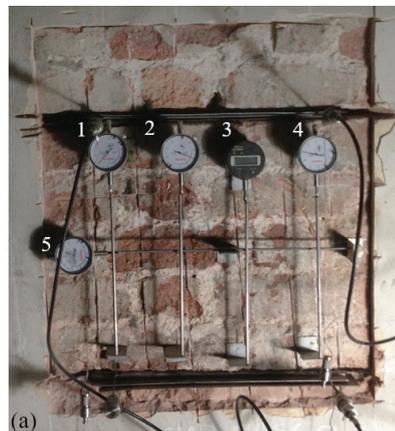


Figura 14 (a) Ensaio de macaco plano duplo; (b) diagramas tensão × deformação específica da alvenaria de tijolos.

Tabela 3 Fatores de correlação entre pressão interna e externa do macaco

Parâmetros	Valores	Unidades
K_m (coeficiente de calibração)	0,910	–
K_a (coeficiente de área)	0,812	–
A (área total do macaco)	0,0406	m ²
A_r (área dos rasgos)	0,0500	m ²

Os diagramas tensão x deformação específica com a estimativa de módulo de elasticidade da alvenaria local por meio do coeficiente angular da linha de tendência estabilizada em cerca de 5600 MPa são apresentados na Figura 14b. A precisão da linha de tendência é aceitável, com aproximadamente 99,8% para o valor de R2. O comportamento em fase crescente de aplicação de carga foi bastante linear. O primeiro desvio da linha de carga do relógio comparador horizontal foi observado a uma tensão de 3,0 MPa, indicando o aparecimento da primeira micro-fissuração. As fissuras visíveis surgiram com uma tensão de 4,8 MPa, que corresponde ao segundo desvio na linha de carga do relógio comparador horizontal. Verifica-se que os módulos de elasticidade obtidos pela técnica de macacos planos e pelo ensaio de ultrassom na alvenaria de tijolos são muito próximos. Essa semelhança oferece maior consistência aos resultados obtidos nos ensaios de ultrassom e no ensaio de macaco plano duplo.

3.7 GPR

Aplicou-se a técnica de *Ground Penetrating Radar* (GPR) com o objetivo de estimar a espessura total das cascas, de suas camadas constituintes e aferir as dimensões dos tijolos com dados de outros ensaios, assim como detectar eventuais materiais incorporados nos elementos e danos.

Todo levantamento de dados com GPR foi realizado no extradorso das cascas, utilizando o sistema da MALA GeoScience, constituído por antenas de frequência de 1,2 GHz, providas de odômetro. Uma faixa de espuma sintética de etileno acetato de vinila (EVA) de espessura de 3 mm foi utilizada para facilitar o movimento das rodas da unidade das antenas sobre as cascas.

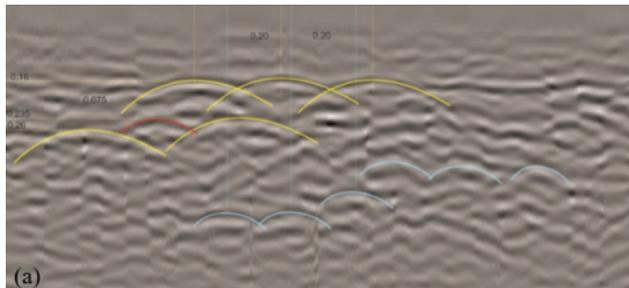


Figura 15 Parede lateral da cúpula: (a) radargrama; (b) determinação da espessura.

Utilizou-se o software *Reflex2Dquick* para o processamento das imagens por meio da imediata aplicação do filtro Dewow e

função de ganho para compensar a atenuação do sinal ao longo da profundidade. O procedimento padrão para calibração da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas num material é realizado pela medição do tempo de percurso de ida e volta na seção, posicionando uma chapa metálica na superfície oposta do elemento. Porém, devido às dificuldades de acesso à superfície oposta das cascas, tal procedimento foi impraticável no presente estudo. Como se tratam de elementos compostos por diversos materiais, adotou-se a velocidade da alvenaria como padrão para a seção, por ser o material predominante na constituição das cascas. A velocidade da onda na alvenaria v foi estimada em 0,15 m/ns, a partir do tempo de ida e volta registrado no radargrama da parede lateral da cúpula da Av. Rio Branco, trecho próximo a um shaft, em que a alvenaria de tijolos se encontrava exposta e foi possível observar as características típicas da alvenaria de tijolos e medir sua espessura Figura 15. A velocidade adotada é compatível com as determinadas por Fernandes em alvenarias de tijolo cerâmico de construções históricas [22].

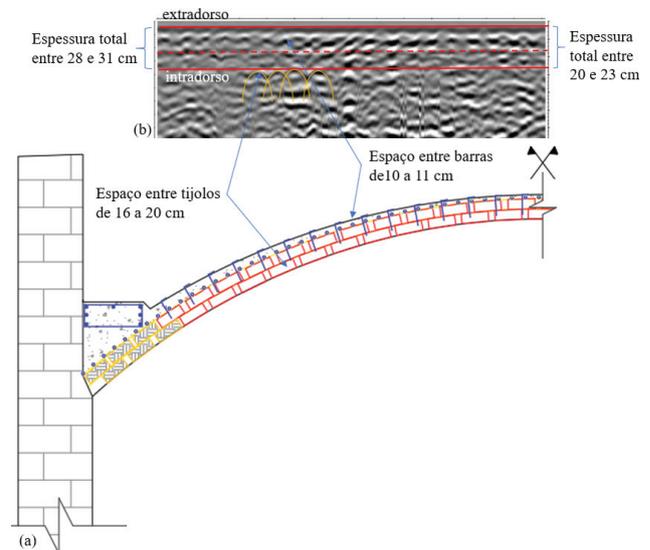


Figura 16 Seção transversal da abóbada: (a) detalhe construtivo; (b) radargrama.

O sinal eletromagnético perdeu energia ao incidir nas barras da tela metálica, gerando dispersão significativa ao longo da seção das cascas. Apenas nos trechos em que a armadura se apresentou transversal ao percurso das antenas o sinal foi propagado suficientemente, sendo possível estimar a espessura das cascas e suas camadas, assim como a dimensão das unidades da alvenaria. A Figura 16 representa as características construtivas e radargramas típicos da abóbada do foyer. Observou-se um padrão de parábolas consecutivas com espaçamento entre 16 a 20 cm no alinhamento do intradorso, indicando ser os tijolos, cujas dimensões são compatíveis com as encontradas no ensaio de termografia infravermelha. As barras da tela metálica apresentam espaçamento entre 10 e 11 cm, informação confirmada em ensaio de pacometria e descrito no relatório de Schiros (1978) [8], assim como a presença de pinos metálicos, com espaçamentos típicos de 20 cm. Foi identificada

camada intermediária, confirmando as informações de relatório da época do reforço sobre duas camadas de tijolos [8], possivelmente com espessura entre 10 a 12 cm. Por se tratarem de elementos compostos por diversos materiais não foi possível detectar danos como vazios e fissuras nas cascas investigadas pelo GPR, utilizando-se antenas de 1,2 GHz. Para tal finalidade sugere-se o uso de antenas de maior frequência, com resolução mais adequada.

4 Conclusões

Técnicas não destrutivas foram aplicadas com o objetivo de determinar as propriedades geométricas, construtivas e mecânicas das cascas em alvenaria de tijolos do Theatro Municipal do Rio de Janeiro, edifício construído no início do século XX. Com pinturas de artistas renomados em seu intradorso, as cascas tiveram risco de colapso na década de 1970 devido a recalques diferenciais e umidade, comprometendo suas pinturas, por isso as cascas foram reforçadas com concreto projetado. A metodologia, os resultados obtidos e as limitações de cada técnica foram apresentados.

A fotogrametria se mostrou eficaz para a reprodução digital e tridimensional da superfície das cascas, além de precisão na detecção de desníveis e de descontinuidades em superfícies, sendo útil para o monitoramento estrutural. A alta definição das ortofotos permite o registro de obras de artes.

A termografia infravermelha permitiu detectar a incidência de umidade na alvenaria, a paginação da alvenaria de tijolos, fissuras já tratadas, insertos metálicos ocultos e outros detalhes construtivos, sendo uma ferramenta útil para o trabalho de inspeção e avaliação qualitativa de alvenarias com revestimento em argamassa e de difícil acesso. Com o auxílio da fotogrametria para a correção de distorções nas imagens térmicas provenientes da curvatura das cascas, a termografia foi útil na elaboração do mapa de danos, a ser utilizado no planejamento e controle de intervenções futuras.

A pacometria foi útil para mapear as barras de aço imersas no concreto e como apoio para a realização de ensaios subsequentes. Foram identificadas vigas metálicas ocultas pela decoração e determinados os cobrimentos de armadura, espaçamentos e, em alguns locais, o diâmetro das barras dos vergalhões.

A esclerometria se mostrou útil apenas para a avaliação no âmbito qualitativo da estrutura, demonstrando a homogeneidade do comportamento dos materiais ao longo de cada elemento estudado. Diante da impossibilidade da retirada de testemunhos para ensaios destrutivos, os índices esclerométricos não puderam ser correlacionados com propriedades mecânicas.

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica foi aplicado na avaliação da qualidade dos materiais das cascas, das vigas e das paredes em alvenaria de tijolos maciços, estimando propriedades mecânicas.

O ensaio de macacos planos duplos estimou o módulo de elasticidade da alvenaria de tijolos de paredes em 5 600 MPa, valor compatível com os resultados do ensaio de ultrassom. A tensão de compressão atingida no ensaio da parede foi cerca de 6 MPa, correspondente ao limite de capacidade de pressão do equipamento utilizado.

O ensaio de GPR foi útil na estimativa da espessura das cascas, na aferição das dimensões dos tijolos com dados do ensaio de termografia, confirmação de características construtivas e na detecção de materiais ocultos na estrutura. Por se tratarem de elementos compostos por diversos materiais não foi possível detectar danos como vazios e fissuras nas cascas investigadas pelo GPR, utilizando-se antenas de 1,2 GHz. Para tal essa finalidade sugere-se o uso de antenas de maior frequência, com resolução mais adequada.

O programa experimental forneceu dados que confirmaram e complementaram as informações de pesquisa documental, além de dados geométricos, construtivos e de propriedades mecânicas que puderam ser aferidas por diferentes ensaios, sem causar danos nos elementos estruturais e decorativos. Essas informações foram úteis para a elaboração de modelo numérico em etapa subsequente da pesquisa.

Agradecimentos

À Fundação do Theatro Municipal do Estado do Rio de Janeiro, Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal de São Carlos, Universidade do Minho, às empresas Proceq, FLK e Baukunst Arquitetura e Virtualização pela colaboração na realização dos ensaios. A pesquisa recebeu auxílio financeiro da Capes e Faperj, processo número E-26/201.812/2017.

Referências

- [1] ICOMOS – *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*, p. 3–6, 2003.
- [2] Balayssac, J. P.; Laurens, S.; Arluguie, G.; Breyse, D.; Garnier, V.; Dérobert, X.; Piwakowski, B. – "Description of the general outlines of the French project SENSO – Quality assessment and limits of different NDT methods". *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 131–138, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.003>.
- [3] Milovanović, B.; Banjad Pečur, I. – "Review of active ir thermography for detection and characterization of defects in reinforced concrete". *Journal of Imaging*, v. 2, p. 11, 2016, doi:10.3390/jimaging2020011.
- [4] IPHAN – *Lista dos bens tombados e processos em andamento (1938 - 2018)*, 2018, http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Lista_bens_tombados_processos_andamento_2018 (acessado 10 de dezembro de 2018).
- [5] INEPAC – *Theatro Municipal - processo 03/0408/71, Port. E 02.*, 2019. http://www.inepac.rj.gov.br/index.php/bens_tombados/detalhar/249 (acessado 23 de janeiro de 2019).
- [6] Cintra, D. C. B.; Roehl, D. M.; Sánchez Filho, E. S.; Santos, M. F. S. F.; Filizola, G.; Assumpção M. S. – "Structural intervention case in the Theatro Municipal do Rio de Janeiro", in: *3rd International Conference on Protection of Historical Construction*, Lisbon, Portugal, 2017.
- [7] FUNTERJ – "Vistoria do prédio do Theatro Municipal do Rio de Janeiro – considerações gerais". *Relatório técnico*, 1975.
- [8] Schiros, L. M. – "Recuperação estrutural das cúpulas do foyer do Theatro Municipal do Rio de Janeiro". *Colóquio sobre Patologia do Concreto e Recuperação Estrutural - Instituto Brasileiro do Concreto*, p. 188–204, 1978.

- [9] Fundação do Theatro Municipal do Rio de Janeiro. Evolução arquitetônica do Theatro Municipal. Desenhos de acervo do TMRJ, 2009.
- [10] D'Amelio, S.; Brutto, M. L. – "Close range photogrammetry for measurement of paintings surface deformations", in: *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing Spatial Information Sciences* Vol.XXXVIII-5/W1 Commission. V-WG 4, 25-28 Feb, Trento, Italy, p. 1-6, 2009.
- [11] Acikgoz, S.; Soga, K.; Woodhams, J. – "Evaluation of the response of a vaulted masonry structure to differential settlements using point cloud data and limit analyses". *Construction and Building Materials*, v. 150, p. 916-931, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.075>.
- [12] Cortizo, E. C. – *Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: ênfase em edificações do patrimônio histórico*, 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
- [13] Soriano, F. L. D. A. – *Patologias em estruturas de diques marítimos com o auxílio da termografia e sua manutenibilidade*, 104 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Construção). Universidade Federal Fluminense, Niteroi, 2013.
- [14] *Proceq SA, Profometer – operating instructions*. Switzerland, 2017.
- [15] *Proceq SA, Silver Schmidt – operating instructions*. Switzerland, 2016.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR 7584 – *Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2012.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR 8802 – *Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. Rio de Janeiro, 2019.
- [18] Miranda, L. F. B. - *Ensaio acústico e de macacos planos em alvenarias resistentes*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2011.
- [19] Lee, B. J.; Kee, S.-H.; Oh, T.; Kim, Y.-Y. – "Evaluating the dynamic elastic modulus of concrete using shear-wave velocity measurements". *Advances in Material Science and Engineering*, p. 13, 2017, doi:1651753.
- [20] ASTM, C1197-14 – *standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flatjack method*, 2014, doi:10.1520/C1197-14A.
- [21] Cescatti, E.; Benetta, M. D.; Modena, C. – "Analysis and evaluations of flat jack test on a wide existing masonry buildings sample". *Brick and Block Masonry - Trends, Innovations and Challenges*, p. 1485-1491, 2016.
- [22] Fernandes, F. M. C. P. – *Evaluation of two novel NDT techniques – microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry*, 256 p. Tese (Doutoramento) Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, 2006.