

## METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE ABÓBADAS E CÚPULAS EM ALVENARIA

Cintra, Danielli<sup>1\*</sup>; Roehl, Deane<sup>2\*</sup>; Sánchez Filho, Emil<sup>3\*\*</sup>; Lourenço, Paulo<sup>4\*\*\*</sup>; Mendes, Nuno<sup>5\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> daniellicbc@gmail.com, <sup>2</sup> droehl@puc-rio.br, <sup>3</sup> emilsanchez@uol.com.br, <sup>4</sup> pbl@civil.uminho, <sup>5</sup> nunomendes@civil.uminho.pt

\* Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

\*\* Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Niterói, RJ, Brasil

\*\*\* Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal

**Palavras-chave:** ensaio não destrutivo; análise não linear; abóbada e cúpula em alvenaria; recalque diferencial; Theatro Municipal do Rio de Janeiro.

### Resumo:

*Abóbadas e cúpulas em alvenaria representam uma tipologia estrutural muito difundida em edificações históricas devido à sua imponência estética, simbolismo, leveza, eficiência acústica e desempenho estrutural, cobrindo desde pequenos a grandes vãos. Uma das principais causas de danos nesses elementos é o recalque diferencial atribuído a obras no entorno. Uma investigação de abordagem histórica, experimental e numérica foi realizada no Theatro Municipal do Rio de Janeiro, no Brasil, edifício de arquitetura eclética do início do século XX. Suas abóbadas e cúpula em alvenaria possuem pinturas de renomados artistas no intradorso e foram objeto de intervenção na década de 1970, pois encontravam-se na iminência de colapso devido aos efeitos das obras do metrô nas imediações. O objetivo é apresentar metodologias de monitoramento preventivo baseadas na anamnese, caracterização da estrutura por meio de ensaios não destrutivos e avaliação da vulnerabilidade por análise não linear. Diversas hipóteses de recalque diferencial sob ações gravitacionais foram investigadas até a reprodução do padrão de fissuração do passado.*

## 1 INTRODUÇÃO

Elementos como abóbadas e cúpulas em alvenaria representam uma das tipologias estruturais mais difundidas em construções históricas devido à imponência estética, simbolismo, leveza, eficiência acústica e desempenho estrutural, cobrindo desde pequenos a grandes vãos. O estudo do comportamento dessas estruturas desperta grande interesse desde épocas remotas até a atual, utilizando sempre as mais avançadas tecnologias disponíveis [1].

Uma das principais causas de danos em cascas em alvenaria é o recalque diferencial nas fundações [2], que, no caso de área urbana, geralmente são provenientes de obras subterrâneas no entorno [3–5]. O monitoramento do desempenho dessas estruturas pode contribuir com a segurança da própria construção e de seus usuários, com a preservação de patrimônio histórico e artístico, já que frequentemente possuem obras de arte integradas no seu intradorso. Também pode minimizar custos com manutenção corretiva, restrições no uso do imóvel e tempo de interdição, sendo que monumentos históricos são atrativos turísticos, portanto, sua utilização e conservação não são apenas demanda social, mas também econômica.

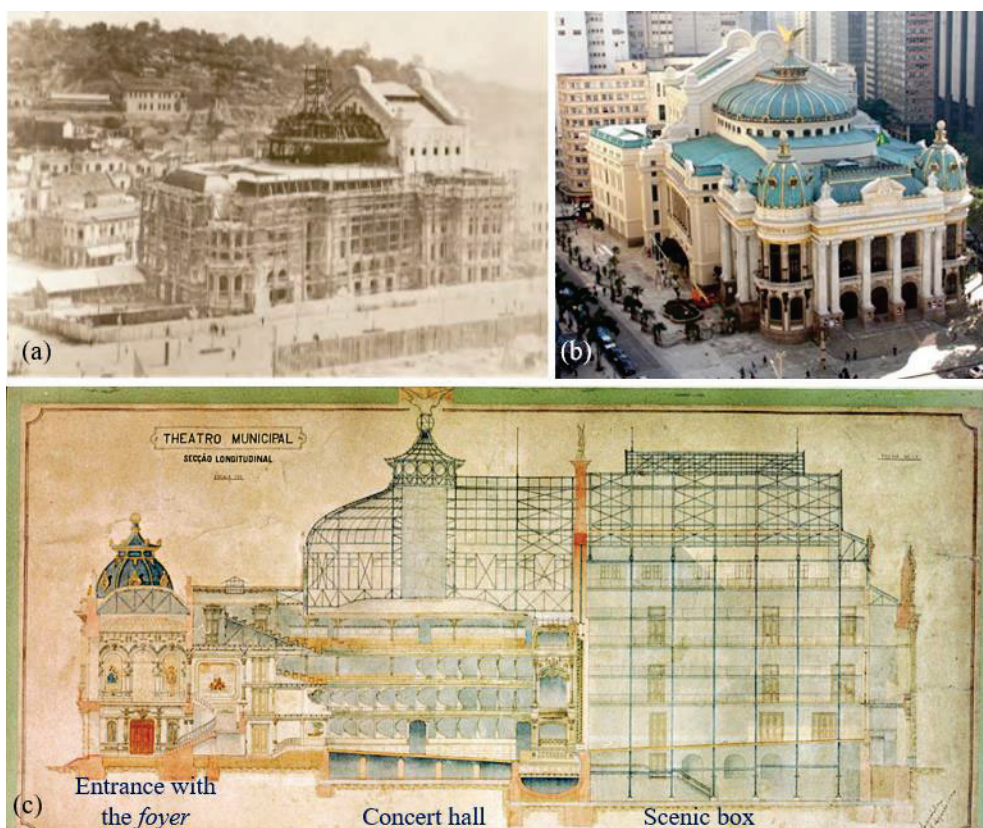
As estruturas de patrimônio arquitetônico apresentam uma série de desafios para o diagnóstico e conservação devido à escassez de registros construtivos, diversidade de materiais, restrições de acesso, contato e extração de amostras, que limitam a aplicação de normas técnicas modernas e padrões construtivos [6]. O estudo dessas estruturas requer uma abordagem multidisciplinar, utilizando-se metodologias iterativas similares às da medicina: anamnese, diagnóstico, terapia e controle, que correspondem, respectivamente, à busca por informações históricas significantes, determinação das causas de danos e deterioração, escolha das medidas corretivas e controle da eficiência das intervenções. Para a compreensão do comportamento estrutural e dos danos existentes em um edifício, visando a menor extensão possível de intervenção, conta-se com meios modernos de investigação e com ferramentas computacionais de análise não linear [7].

Este trabalho apresenta uma combinação de diferentes técnicas de diagnóstico e análise com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural das cascas em alvenaria de um notável exemplar do patrimônio histórico brasileiro, o Teatro Municipal do Rio de Janeiro (TMRJ), cujas cúpulas e abóbada possuem pinturas de artistas renomados em seu intradorso e foram objetos de reforço na década de 1970. A partir de extensa pesquisa documental, apresentam-se as principais características projetuais e construtivas do edifício, em especial das suas cascas, com descrição da anamnese estrutural. Em seguida foi elaborado um programa experimental a fim de investigar a condição atual das cascas em alvenaria, por meio de inspeção visual e caracterização geométrica, de materiais e de danos por meio de ensaios não destrutivos realizados *in situ*.

Depois, um modelo numérico da parte frontal do edifício foi elaborado e calibrado para análise não linear utilizando o método dos elementos finitos. A interação entre solo e estrutura é estudada para diferentes situações de rigidez do solo, a fim de identificar as causas dos danos relatados na estrutura na década de 1970. Análises estáticas não lineares considerando cargas gravitacionais são realizadas para avaliar a capacidade de carga das cúpulas e abóbada na condição original e reforçada e analisar a eficiência do reforço. Por fim, os resultados das análises são comparados com dados experimentais para justificar os danos ocorridos antes do reforço e avaliar as condições atuais de segurança da estrutura.

## 2 PESQUISA HISTÓRICA – ANAMNESE

Um dos mais imponentes e belos edifícios do Rio de Janeiro, o TMRJ é considerado como a principal casa de espetáculos do Brasil e uma das mais importantes da América do Sul. A arquitetura do edifício é considerada a maior representante do estilo eclético no Rio de Janeiro [8] e foi inspirada no Palais Garnier de Paris. Num esforço do antigo Prefeito Pereira Passos para a modernização da cidade, que era a capital do país, o TMRJ foi construído entre 1905 e 1909 (Figura 1a-b), simultaneamente a outros edifícios monumentais dos arredores, com sistemas construtivos similares, como a Biblioteca Nacional, o Museu Nacional de Belas Artes e a antiga Caixa de Amortização, que são tombados como patrimônio histórico e artístico nacional, desde 1973. Além desses edifícios destacam-se também o Clube Naval e o Palácio Monroe (demolido em 1976), construídos na mesma época.



**Figura 1** – Theatro Municipal do Rio de Janeiro: (a) construção da cobertura, por Augusto Malta (1906); (b) fachada atual; (c) seção longitudinal, por Francisco Oliveira Passos, 1904 [9].

Fonte: (a,c) coleção do Centro de Documentação do Theatro Municipal do Rio de Janeiro (CEDOC).  
 (b) O Theatro Municipal – História. In: <http://www.theatromunicipal.rj.gov.br/sobre/historia/>, access: 10/12/2016.

### 2.1 Características construtivas e estruturais

O edifício do TMRJ pode ser dividido em três partes principais: a entrada, com o foyer; a sala de espetáculos e a caixa cênica, com o palco (Figura 1c). Foi construído num terreno de solo alagadiço, tendo sido utilizadas cerca de 1180 estacas de atrito em madeira com comprimento entre 4 m e 11 m para sua fundação [10].

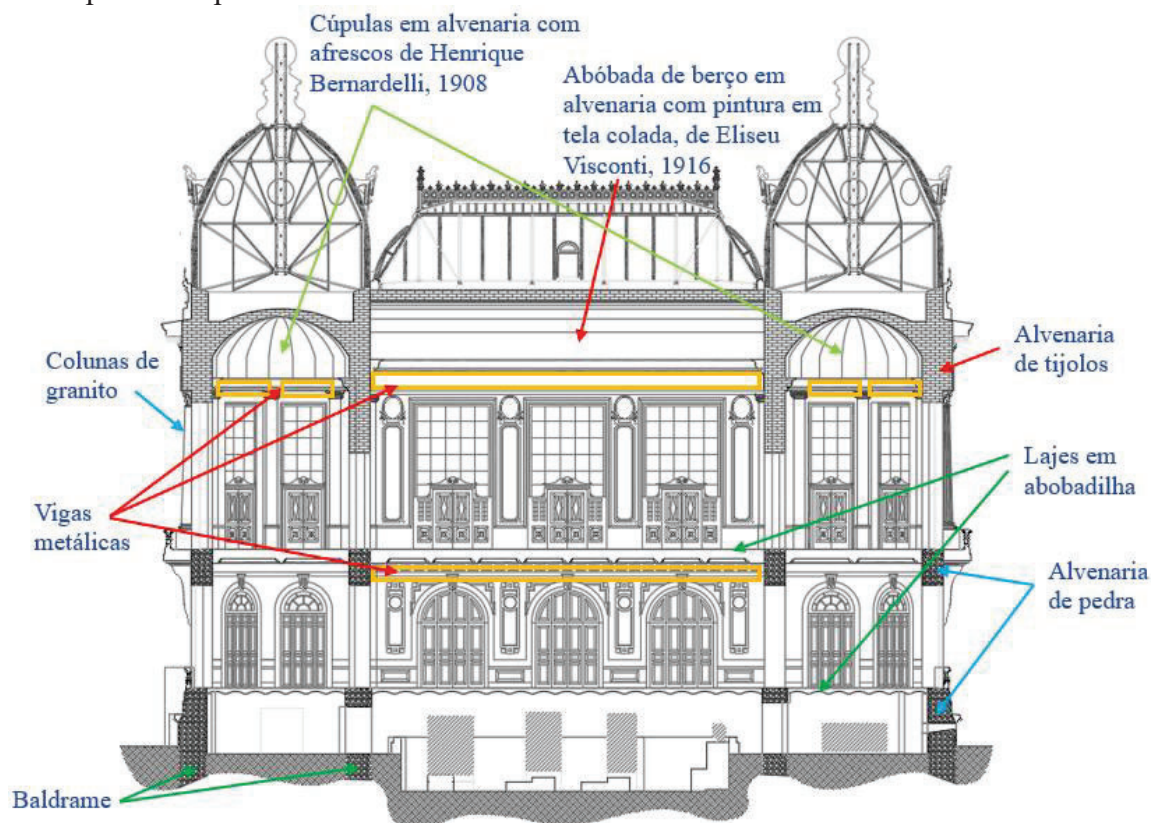
O sistema estrutural do TMRJ é composto por diversos materiais (Figura 2a), dentre eles, paredes periféricas em alvenaria, constituídas por pedras no pavimento inferior e

tijolos maciços cerâmicos na parte superior, assentados com argamassa mista de cal e cimento. Há 14 colunas de granito da Candelária na fachada. Internamente, os pavimentos apoiam-se em colunas e capiteis maciços de mármore sobre os pedestais de granito.

A sala de espetáculos foi projetada como um reticulado de elementos de aço, tendo como peças principais 12 colunas de sustentação da cobertura e uma grande cúpula elíptica em estuque, além dos consolos dos diferentes níveis da plateia [10]. Por prejudicarem a visão do palco, tais colunas foram substituídas por vigas de transição treliçadas de concreto armado em 1934 [11].

O piso dos pavimentos consiste em lajes formadas por vigas de aço e blocos cerâmicos furados em abobadilha com capa de argamassa cimentícia. A cobertura constitui-se de treliças de aço e forro em madeira, que apoiam chapas de cobre com pátina azinhavrada e ornatos estampados com folhas de ouro 23 quilates.

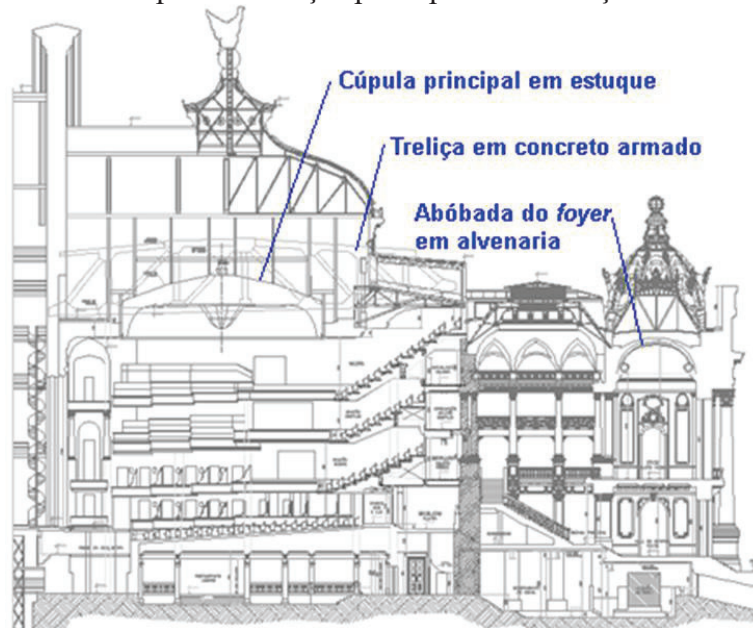
No andar superior do TMRJ situa-se a denominada área nobre (Figura 2b), próxima ao centro da fachada principal, onde existe o foyer, um salão para recepção do público, coberto por uma abóbada de berço cilíndrica com dimensões no intradorso de 6.69 m x 17.42 m e 2.60 m de flecha, construída em alvenaria com camada dupla de tijolos cerâmicos assentados com argamassa de cimento e cal. As duas rotundas laterais, possuem teto em cúpula esférica, com diâmetro de 6.28 m e 2.75 m de flecha e foram construídas em alvenaria de tijolos cerâmicos assentados com argamassa de cimento e cal. As cúpulas e a abóbada foram construídas em 1907, apoiadas em todo perímetro sobre paredes e pilares.



**Figura 2** – Seção transversal da área nobre do TMRJ. Fonte: adaptado do projeto arquitetônico [9].

## 2.2 Ampliação da Sala de Espetáculos

Em 1934, constatou-se que o TMRJ estava pequeno para a demanda da crescente população da cidade, então a capacidade da sala de espetáculos foi ampliada de 1739 para 2361 lugares. A obra foi realizada em três meses e conferiu as características atuais da estrutura. O projeto estrutural da reforma foi elaborado pelos engenheiros Paulo Fragoso e Bjarne Ness [11]. Colunas de aço que sustentavam os diversos pavimentos da plateia e prejudicavam a visão do palco em determinados locais foram substituídas por 3 vigas principais de transição treliçadas de concreto armado com vão de 30,5 m e cerca de 5 m de altura, sendo duas delas apoiadas nas extremidades pela parede isoladora da caixa cênica e parede em alvenaria do hall das escadas e a terceira apoiada nas paredes laterais do Theatro (Figura 3). Treliças transversais de concreto armado passaram a apoiar a carga da cobertura e transferi-la para as treliças principais de transição.

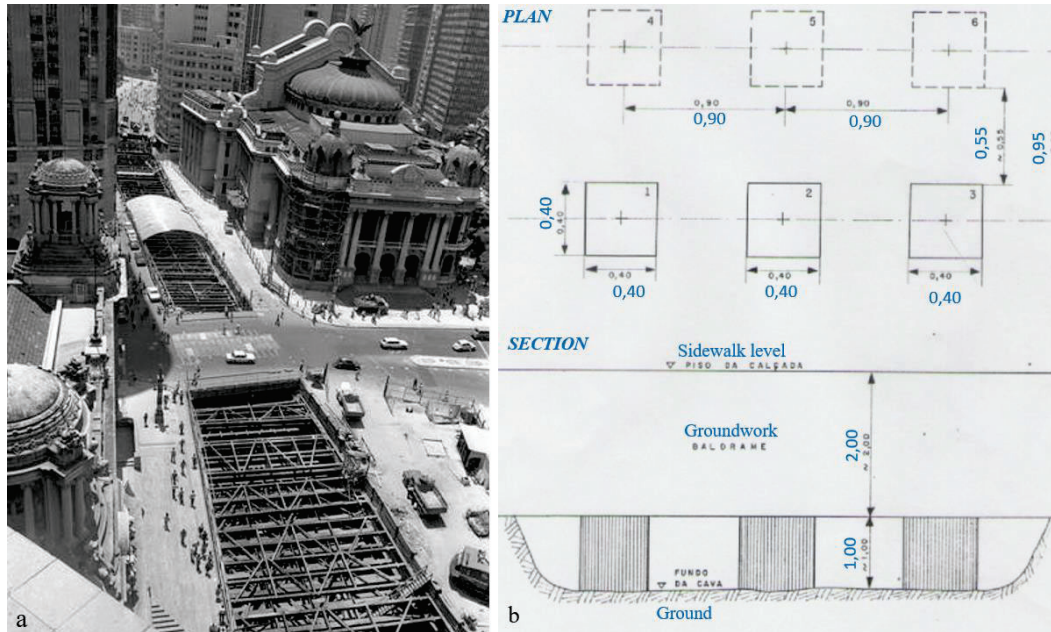


**Figura 3:** Seção longitudinal após reforma de 1934.  
Fonte: Adaptado de projeto arquitetônico [9].

Os diversos pavimentos da plateia originalmente em abobadilhas também foram reformados com a construção de estrutura de concreto que chega a ter 6 m de balanço, alterando a planta original em forma de ferradura. A cobertura das galerias foi completamente removida e refeita cerca de 4,5 m acima do nível original, tendo modificado a volumetria do Theatro. Durante a reforma foi construída uma nova estrutura para as galerias em concreto armado, formada por vigas e pilares. A antiga estrutura metálica passou a ter apenas a função de suspender o forro e sua cúpula elíptica.

## 2.3 Obras do metrô na Av. Treze de Maio

O metrô do Rio de Janeiro foi inaugurado em 1979, após 9 anos de construção, com a Linha 1 passando sob a Av. Treze de Maio, ao lado do TMRJ (Figure 4a). Em meados de 1969, antes do início das obras, a empresa Sondotécnica, contratada pela Companhia do Metropolitano do Rio de Janeiro, realizou uma verificação do estado das fundações do TMRJ.



**Figure 4** – TMRJ: (a) construção do metro na década de 1970; (b) planta e seção transversal típica das estacas em madeira [12]. Fonte: a) Foto – Paulo Moreira, 21/05/1975, <https://acervo.oglobo.globo.com>, acesso 06/10/2017.

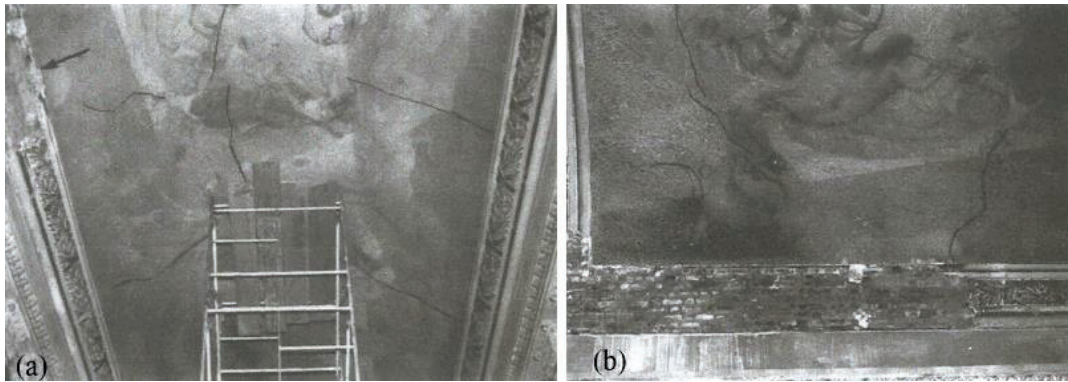
Foram feitas escavações em dois pontos da Av. Treze de Maio, permitindo o acesso e inspeção direta das estacas em madeira (Figure 4b), que se encontravam em boas condições, totalmente imersas pelo lençol freático, de 1.9 m de profundidade [12]. A partir de então, foi formada uma comissão permanente para manter as fundações do edifício do TMRJ em constante observação.

#### 2.4 Reforço das cascas em alvenaria

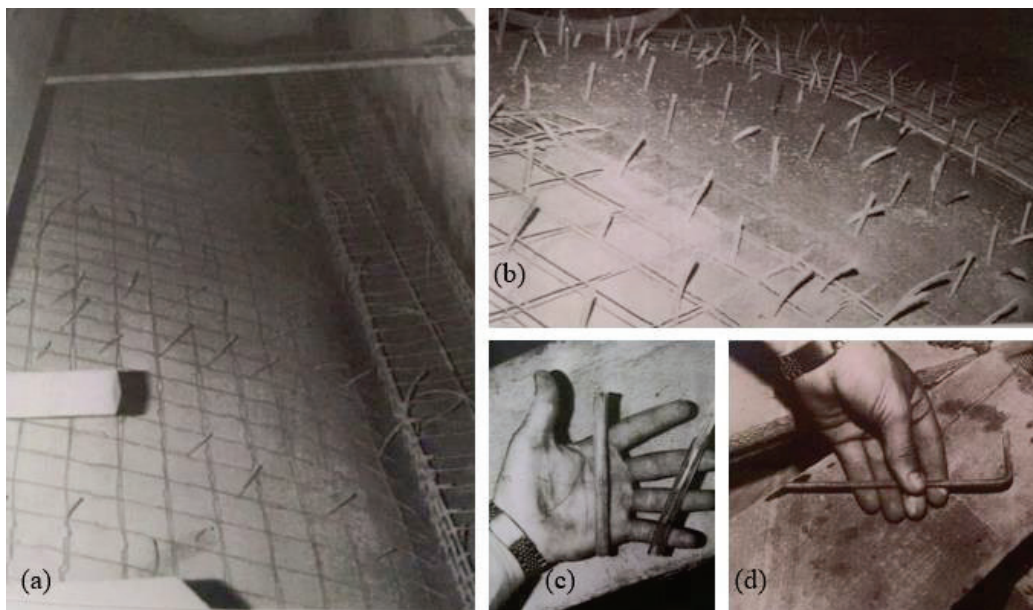
O tempo, os eventos festivos, vandalismo, infiltrações no telhado, as obras no entorno, como a construção do metrô na década de 1970, entre outras ocorrências, danificaram o edifício (Figura 5a-b). Com pinturas de artistas renomados como Eliseu Visconti e Henrique Bernardelli no intradorso, as cascas em alvenaria do TMRJ corriam risco de colapso na década de 1970, devido a recalques diferenciais e umidade, comprometendo as pinturas, segundo relatórios da época [13,14].

Em 1976 a abóbada e as duas cúpulas foram reforçadas, sendo que toda a intervenção foi executada em três dias, sem pisar sobre as cascas e sem escoramento para não danificar as pinturas no intradorso. O trabalho consistiu nas seguintes etapas [14]:

- a) **etapa 1** - construção de vigas laterais e uma casca sobreposta em concreto projetado armado com tela metálica, a fim de suportar parte do peso da casca original, conforme Figura 6a. Na concretagem, deu-se prioridade à criação de arcos sobre as maiores fissuras transversais (Figura 6b);
- b) **etapa 2** – injeção de epóxi nas fissuras para restabelecer o monolitismo das cascas, por meio de purgadores plásticos, de acordo com a Figura 6b;
- c) **etapa 3** – ancoragem de insertos metálicos imersos em furos preenchidos com epóxi, a fim de promover a aderência entre a casca original em alvenaria e a nova em concreto (Figura 6c-d).



**Figura 5** – Imagens de danos na abóbada na década de 1970, por Shiros [14]: (a) fissuras;(b) perda de revestimento da sanca lateral.



**Figura 6**–Imagens de intervenção estrutural na década de 1970, por Schiros [14]: (a) viga lateral; (b) concretagem; (c) purgadores para injeção de resina; (d) inserto metálico.

### 2.5 Outras intervenções e ocorrências

No período entre 1987 a 2010, ocorreram intervenções arquitetônicas e de modernização de instalações no edifício. Em 25 de janeiro de 2012, três edifícios com 20, 4 e 10 andares, desabaram a cerca de 20 m da parte posterior do TMRJ, deixando mais de 22 vítimas entre mortos e desaparecidos. Tal ocorrência foi atribuída a intervenções estruturais irregulares em um dos edifícios, que também apresentou problemas de recalque diferencial na década de 1970 [15]. Nenhuma avaria foi constatada no TMRJ.

Em abril de 2017 houve um princípio de incêndio provocado por um artefato atirado contra um dos vitrais da fachada durante uma manifestação popular e, felizmente, o fogo foi controlado.

## 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

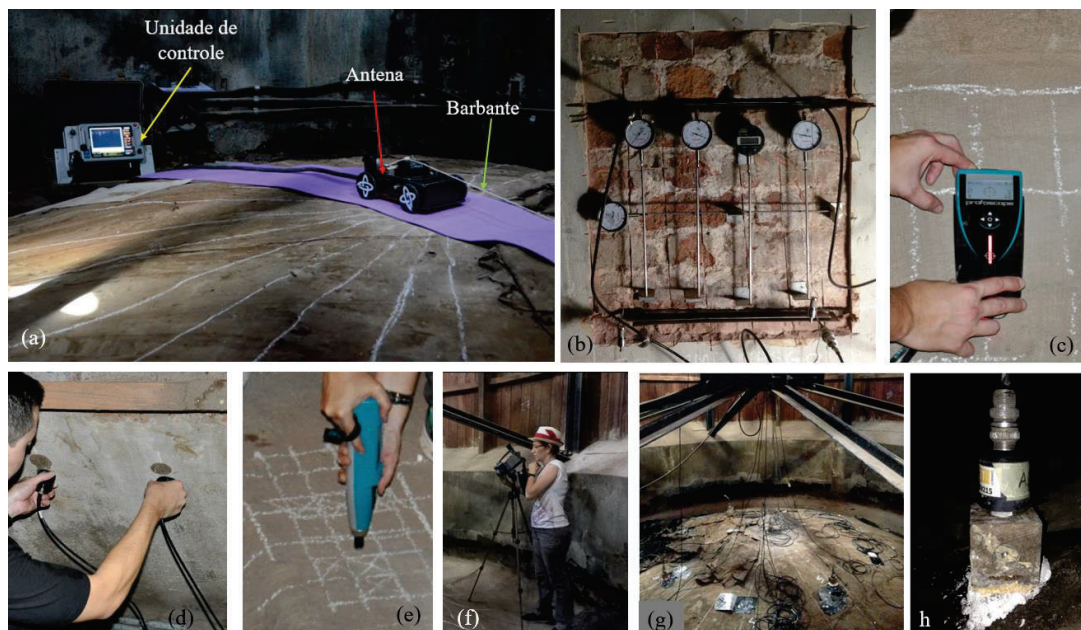
Os ensaios não destrutivos (END) são recursos investigativos utilizados *in situ* que não causam danos permanentes nem comprometem a capacidade resistente do elemento ensaiado. Desde que bem executados, esses ensaios podem ser úteis e confiáveis para

subsidiar os diversos níveis de inspeção e para monitorar construções existentes, em especial, as de patrimônio histórico, que não podem receber alterações que comprometam sua autenticidade, tendo restrições na retirada de amostras e prospecções.

Há muitas técnicas de END, cada uma baseada em diferentes princípios teóricos, sendo que a execução dos ensaios, operação de equipamentos e processamento dos dados requerem profundo conhecimento e experiência na aplicação de cada técnica especificamente ou de maneira combinada. Isoladamente, nenhuma das técnicas é capaz de detectar todos os tipos de defeitos em qualquer tipo de material. Além disso, a confiabilidade das informações sobre propriedades mecânicas obtidas pelos END é consideravelmente comprometida sem a execução de ensaios semidestrutivos ou destrutivos de referência para a devida correlação. Porém, a combinação entre várias técnicas, os cuidados na execução dos mesmos e o conhecimento dos fatores que influenciam nos resultados facilitam a interpretação dos dados e validam a estimativa das informações pretendidas.

Sem o suporte do conhecimento histórico da construção, a interpretação dos resultados dos ensaios pode ser consideravelmente comprometida, mesmo sendo realizada por equipe especializada. Portanto, somente com a compreensão do processo construtivo, do comportamento estrutural, da anamnese e dos efeitos do entorno é que se tem subsídios para a interpretação específica e combinada dos resultados experimentais aplicados na caracterização e avaliação de integridade de construções existentes, o que demanda um trabalho multidisciplinar [16]. Na ausência de uma pesquisa *in loco* ou de dados confiáveis, aconselha-se que sejam assumidas as premissas mais cautelosas.

Grande parte dos elementos da estrutura do TMRJ têm propriedades desconhecidas e estão ocultos pela decoração característica do estilo eclético. Assim, foi elaborada uma campanha de END para estimar propriedades geométricas, físicas e mecânicas da estrutura, como ilustra a Figura 7. Como exemplo, as técnicas de termografia infravermelha e de fotogrametria foram utilizadas na elaboração do mapa de danos (Figura 8), a ser utilizado no planejamento e controle de intervenções futuras.



**Figura 7** – END realizados no TMRJ: (a) Ground Penetration Radar (GPR) [17]; (b) macaco plano duplo; (c) pacometria; (d) ultrassom; (e) esclerometria; (f) termografia infravermelha; (g) ensaio dinâmico; (h) acelerômetro uniaxial.



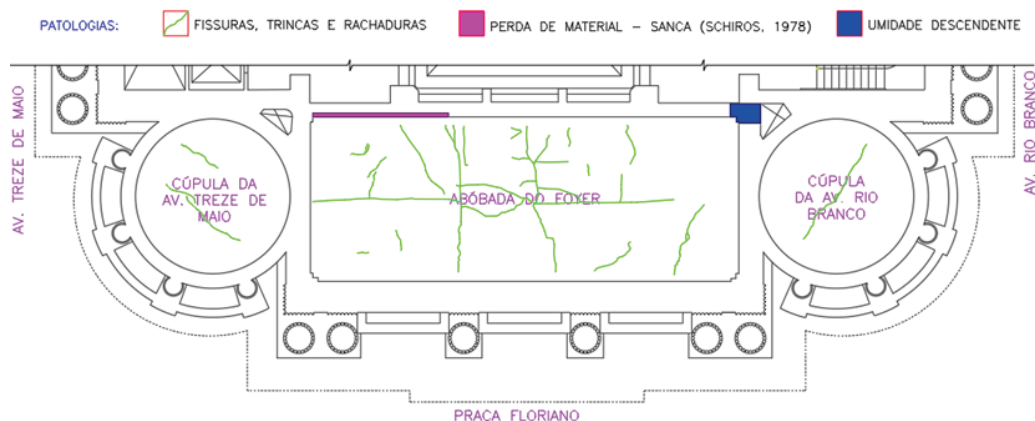


Figura 8 – Mapa de danos do intradorso das cascas [18].

O programa experimental realizado no TMRJ (Quadro 1) forneceu dados que confirmaram e complementaram as informações de pesquisa documental, além de dados geométricos, construtivos e de propriedades mecânicas que puderam ser comprovadas por diferentes ensaios. Tais informações foram úteis para a elaboração e validação de modelo numérico e forneceram valores de referência para o acompanhamento da integridade das cascas e suas pinturas ao longo do tempo.

Quadro 1– Programa experimental realizado no TMRJ

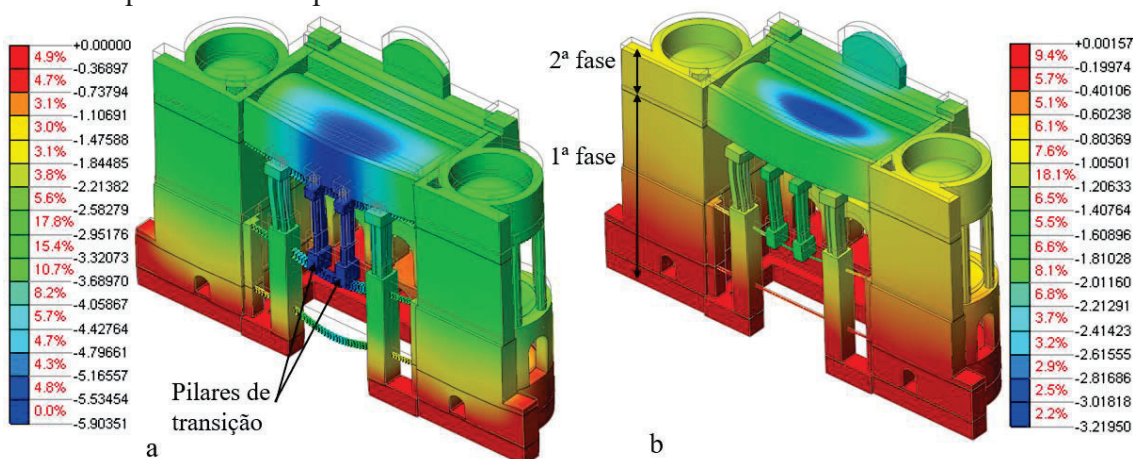
Informação		END								
		Fotogrametria	Termografia	Ultrassom	Impacto eco	GPR	Pacometria	Esclerometria	Dinâmico	Macaco plano duplo
Caracterização	Mapeamento de danos	X	X							
	Umidade		X							
	Deteção de elementos não visíveis		X			X	X			
	Levantamento geométrico	X								
	Espessura de elementos				X	X				
	Homogeneidade do material			X	X			X		
	Propriedades mecânicas			X						X
	Calibração de modelos numéricos								X	
Registros de obras de arte	X									
<b>Monitoramento</b>		X	X					X	X	
<b>Controle de intervenções</b>			X	X	X		X			

#### 4 ANÁLISE NUMÉRICA

Após a análise histórica e o desenvolvimento do programa experimental, a etapa seguinte foi avaliar o desempenho estrutural das cúpulas e abóbada do TMRJ antes e depois do reforço realizado na década de 1970, com foco no nível de segurança sob condições de cargas gravitacionais, complementando estudos preliminares realizados [19].

As análises foram realizadas pelo método dos elementos finitos no software DIANA 10.2 [20]. O modelo consiste em 1485894 elementos sólidos tetraédricos que representam as alvenarias, as rochas e o concreto; 8742 elementos de casca triangulares para as lajes em abobadilhas, 196 elementos de viga com 2 nós para as vigas metálicas simplesmente apoiadas nas paredes; 2690 elementos tridimensionais triangulares planos baseados em interpolação linear com esquema de integração em 3 pontos para representar a interface da fundação com o solo; 1410 elementos de mola de translação de um nó para representar a rigidez axial das paredes omitidas no modelo. Somente cargas gravitacionais foram adotadas, considerando o peso próprio dos elementos da estrutura e do telhado, que foi estimado em  $1 \text{ kN/m}^2$ .

Simulações de diferentes condições de suporte sob efeito do peso próprio da estrutura frontal do TMRJ foram realizadas por meio de análise estática não linear, a fim de identificar regiões e elementos associados a potenciais vulnerabilidades e investigar as possíveis causas dos danos relatados na década de 1970. A Figura 9 apresenta os deslocamentos verticais do modelo sob o efeito da evolução construtiva da estrutura, demonstrando a maior sensibilidade da abóbada em alvenaria, especialmente em relação aos recalques dos seus apoios.



**Figura 9:** Deslocamentos (mm) da análise não linear física: (a) carregamento instantâneo; (b) com 2 fases construtivas.

Os movimentos diferenciais em apoios são problemas recorrentes para as cascas em alvenaria, pois formam mecanismos de fissuração que resultam em rótulas. Uma das principais causas de recalques diferenciais em área urbana são obras subterrâneas nas proximidades [3,4]. Assim, é importante medir e prever a resposta de deslocamentos em cascas de alvenaria como medida preventiva no caso de escavações no entorno.

O monitoramento de recalques pode ser feito pelo rastreamento de deslocamentos absolutos de vários pontos discretos localizados na estrutura por meio de estações totais. Como medida mais confiável para o controle de recalques diferenciais em cascas, recomenda-se o acompanhamento de deslocamentos tridimensionais de toda a superfície visível do intradorso usando dados de nuvens de pontos para serem aplicados em etapa subsequente de análise limite [2]. As técnicas de fotogrametria e de termografia, utilizadas de maneira combinada, são indicadas para esse caso de monitoramento.

## 5 CONCLUSÕES

A metodologia de avaliação estrutural de cúpulas e abóbadas em alvenaria apresentada foi fundamentada na anamnese, caracterização e observação da estrutura por meio de ensaios não destrutivos e avaliação da sua vulnerabilidade pela análise não linear de modelo numérico calibrado.

Ao longo da pesquisa documental constatou-se que: (a) a construção do TMRJ pode ser considerada como um testemunho dos avanços tecnológicos do início do século XX, destacando-se o sistema de estrutura mista, medidas de projeto para combate a incêndio e ferramentas de planejamento; (b) as intervenções estruturais ocorridas utilizaram técnicas e materiais avançados para cada época; (c) as informações dos documentos consultados foram fundamentais para a interpretação e aferição de alguns dos ensaios.

O programa experimental forneceu dados que: (d) confirmaram e complementaram as informações da pesquisa documental, como dados geométricos, construtivos e de propriedades mecânicas que puderam ser aferidas por diferentes ensaios, sem causar danos aos elementos estruturais e decorativos; (e) foram úteis para a elaboração e validação do modelo numérico; (f) forneceram valores de referência que podem ser utilizados no monitoramento da integridade das cascas e das obras de arte integradas, assim como no controle de intervenções.

A análises numéricas permitiram compreender a influência do recalque diferencial dos apoios na resposta estrutural dos elementos estudados.

Os movimentos diferenciais em apoios podem ameaçar a integridade estrutural de abóbadas e cúpulas em alvenaria, formando mecanismos de fissuração que resultam em rótulas. O monitoramento preventivo de recalques pode ser feito pelo rastreamento de deslocamentos absolutos de pontos discretos localizados na estrutura por meio de nuvem de pontos, que devem ser avaliados em etapa subsequente de análise limite, especialmente em situações de escavação no entorno.

## 6 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] Tralli, A., Alessandri C., Milani G. *Computational methods for masonry vaults: A review of recent results*. Open Civ Eng J, 2014;8:272–87. <https://doi.org/10.2174/1874149501408010272>.
- [2] 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, 2017;150:916–31.
- [3] Boscardin M. D., Cording EJ. *Building response to excavation-induced settlement*. J Geotech Eng, 1989;115:1–21.
- [4] Burland J. B., Wroth C. P. *Settlement of building and associated damage*. Br. Geotech. Soc. Conf. Settl. Struct., London: Pentech Press; 1974, p. 611–54.

- [5] Jucá J. F. T. *Influência de escavações nos recalques em edificações vizinhas*. Master thesis, Federal University of Rio de Janeiro, 1981.
- [6] Cardani G., Binda L. *Guidelines for the masonry quality evaluation in built heritage*. Built Herit. 2013 Monit. Conserv. Manag., 2013, p. 107–15.
- [7] ICOMOS. *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*, 2001.
- [8] Machado EP. *A cobertura do Theatro Municipal do Rio de Janeiro: restauração ou reconstrução?* Master thesis. Iphan, 2012.
- [9] Passos FO. *Projeto Águila - Theatro Municipal do Rio de Janeiro*, 1904.
- [10] Comissão Construtora do Theatro Municipal. *Relatório histórico*, 1909. In: Ferrão C, Soares JPM, editors. *Theatr. Munic. do Rio Janeiro – edição comemorativa 100 anos*, Rio de Janeiro: Kapa Editorial; 2009, p. 278–82.
- [11] Kennedy. *Álbum comemorativo da remodelação do Theatro Municipal*, 1934.
- [12] Sondotécnica. *Exame das fundações do Theatro Municipal do Rio de Janeiro*. Relatório EG-620/69 1969.
- [13] FUNTERJ. *Vistoria do prédio do Theatro Municipal do Rio de Janeiro – considerações gerais*, 1975.
- [14] Schiros L.M. *Recuperação estrutural das cúpulas do foyer do Theatro Municipal do Rio de Janeiro*. Colóquio Sobre Patol Do Concreto e Recuper Estrutural - Inst Bras Do Concreto, 1978:188–204.
- [15] Camara L.A. *Parecer técnico de engenharia - avaliação das causas do desabamento do Ed. Liberdade*, 2012.
- [16] Cintra D.C.B. Ensaio não destrutivo em estruturas. In: Interciência, editor. *Concreto estrutural análise, Dimens. e Patol. / Organ. Emil Souza Sanches Filho*, Rio de Janeiro: 2023, p. 389–429.
- [17] Cintra D.C.B, Manhães P.M.B., Fernandes F.M.C.P., Roehl D.M., Araruna Jr J.T., Sánchez Filho E. de S. *Evaluation of the GPR (1.2 GHz) technique in the characterization of masonry shells of the Theatro Municipal do Rio de Janeiro*. Ibracon Struct Mater J, 2020;13:274–97.
- [18] Cintra D.C.B., Sánchez Filho E. de S., Roehl D.M. *Caracterização das cascas em alvenaria do Theatro Municipal do Rio de Janeiro*. Rev Port Eng Estruturas, 2019; n. 10:39–50.
- [19] Rios M.P. *Structural performance of shells of historical constructions - the Municipal Theatre of Rio de Janeiro*. Master thesis. *Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions*. University of Minho. Guimarães, 2017.
- [20] DIANA FEA BV. *DIANA Finite Element Analysis - Release 10.2*. 2017.