

ESEQUIEL FERNANDES TEIXEIRA MESQUITA

ENGENHARIA DO PATRIMÔNIO

2ª edição revisada e atualizada



São Paulo – SP
2025

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	13
PREFÁCIO	15
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	19
CAPÍTULO 2	
MONITORAMENTO DA SAÚDE ESTRUTURAL (MSE) E O PATRIMÔNIO	27
2.1. INTRODUÇÃO	27
2.2. MUDANÇA DE FOCO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: DE “NOVA CONSTRUÇÃO” PARA “REABILITAÇÃO”	28
2.3. IMPORTÂNCIA DO MSE PARA MANUTENÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL	30
2.4. BREVE HISTÓRICO E RECENTES AVANÇOS NO MSE	35
2.4.1 <i>A história inicial</i>	35
2.4.2 <i>Recentes avanços no MSE</i>	42
2.5. NÍVEL DE RESPOSTAS DAS PLATAFORMAS DE MSE	48
2.5.1 <i>Nível 1</i>	49
2.5.2 <i>Nível 2</i>	51
2.5.3 <i>Nível 3</i>	52

2.5.4. <i>Nível 4</i>	53
2.5.5. <i>Nível 5</i>	54
2.6. CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS: UM CASO ESPECIAL PARA O MSE	56
2.7. NOVAS PERSPECTIVAS PARA MSE	62
2.8. COMENTÁRIOS FINAIS	64
CAPÍTULO 3	
GUIA PARA AVALIAÇÃO DE CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS	67
3.1. INTRODUÇÃO	67
3.2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS	72
3.2.1. <i>Análise documental</i>	72
3.2.2. <i>Inspeção</i>	74
3.2.3. <i>Monitoramento estrutural de CH</i>	76
3.2.4. <i>Caracterização estrutural</i>	77
3.2.5. <i>Modelagem numérica</i>	84
3.2.6. <i>Avaliação estrutural</i>	86
3.2.7. <i>Intervenção (Reforço/Recuperação)</i>	86
3.3. COMENTÁRIOS FINAIS	88
CAPÍTULO 4	
EFEITO DA TEMPERATURA EM ESTRUTURAS DE ALVENARIA	91
4.1. INTRODUÇÃO	91
4.2. A IGREJA DE VILA NOVA DE FOZ CÔA	94
4.3. SISTEMA DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL IMPLEMENTADO NA IGREJA DE FOZ CÔA	97
4.4. COMBINAÇÃO DOS EFEITOS DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR EM DESLOCAMENTOS ESTRUTURAIS	109
4.5. COMENTÁRIOS FINAIS	112

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO ULTRASSÔNICA DE PAINÉIS DE ALVENARIAS HISTÓRICAS 115

5.1. INTRODUÇÃO 115

5.2. IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DOS PRETOS 118

5.3. MIPU – MÉTODO INDIRETO DE PULSO ULTRASSÔNICO 121

5.4. CARACTERIZAÇÃO ULTRASSÔNICA 124

5.5. COMENTÁRIOS FINAIS 131

CAPÍTULO 6

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS COM RECURSO À MÉTODOS DINÂMICOS 133

6.1. INTRODUÇÃO 133

6.2. A IGREJA DE SANTO ANTÓNIO DE VIANA 136

6.3. MONITORAMENTO DO REFORÇO DA IGREJA DE SANTO ANTÓNIO 140

6.3.1. *Sistema de MSE* 141

6.3.2. *Etapas do monitoramento* 142

6.3.3. *Monitoramento do retrofitting da Igreja
de Santo António* 144

6.4. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DA IGREJA DE SANTO
ANTÓNIO DE VIANA 151

6.4.1. *Ensaio pressiométrico* 151

6.4.2. *Caracterização Modal Operacional* 155

6.5. COMENTÁRIOS FINAIS 161

REFERÊNCIAS 163

APRESENTAÇÃO

Para os técnicos envolvidos na gestão e nas intervenções de conservação do patrimônio edificado é fundamental o conhecimento rigoroso dos materiais utilizados (pedra, adobe, madeira, aço, betão ou outro), das características geométricas das estruturas e das técnicas construtivas utilizadas, das manifestações patológicas nas estruturas, suas causas e principais técnicas de reparação, do comportamento dos elementos estruturais e das soluções de reabilitação e reforço adequadas a cada tipo de sistema estrutural.

Nas últimas décadas, nas várias regiões do mundo, o conhecimento nos domínios da patologia e reabilitação das construções históricas tem evidenciado uma evolução significativa, por um lado, pela crescente sensibilização dos diversos intervenientes no património para a necessidade de uma intervenção mais rigorosa e adequada à preservação do seu valor e, por outro lado, pelo surgimento de novos materiais, técnicas, soluções e ferramentas. No Brasil também se assiste a um crescente interesse por uma reabilitação rigorosa. O vasto e rico património histórico espalhado pelo imenso Brasil assim o requer.

A Engenharia Civil, como se mostra neste livro, com base nos novos sensores e sistemas de monitorização, e nas técnicas não destrutivas de apoio à inspeção, pode contribuir para uma caracterização rigorosa do património histórico, dos seus sistemas estruturais, dos seus materiais constituintes, dos problemas que estas



construções apresentam, bem como para a definição e implementação de medidas de intervenção adequadas a cada caso.

Felicito o Esequiel pela preparação deste livro com mais de cem páginas, que servirá como elemento de consulta dos técnicos com atuação no domínio da reabilitação do património, mas também será um interessante elemento de suporte à formação dos estudantes nos domínios da avaliação, caracterização e reabilitação do património.

HUMBERTO VARUM

Professor Catedrático

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As construções históricas (CH) compreendem um grupo especial de construções de engenharia civil que devido ao seu elevado valor cultural, variabilidade, complexidade dos sistemas estruturais e lacuna de informações no meio técnico-científico sobre as propriedades dos seus materiais, sistemas construtivos e comportamento estrutural, tem se tornado um tópico desafiador e de elevado interesse para a comunidade técnica.

Estudar o patrimônio histórico, num primeiro aspecto, para se compreender sobre o seu valor cultural, requer o estudo da conjuntura histórica e da própria evolução da comunidade onde ele se insere. Isto é importante para a compreensão de quais os níveis de intervenção permitidos naquele contexto, por exemplo. Cada comunidade pode definir o nível de intervenção que pode ser praticada em suas construções patrimoniais, que vão desde os níveis mais permissíveis aos mais restritivos, de acordo com a natureza do que se deseja preservar. Esta definição deve ocorrer na forma de uma sociedade organizada, incluindo a participação de técnicos.

É importante esclarecer que no Brasil, a classificação do patrimônio (ou tombamento, como se diz costumeiramente), pode ocorrer em vários níveis, nomeadamente ao nível municipal, pelas câmaras ou municípios; estadual, por órgãos vinculados aos

governos estaduais; federal, pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN. No mundo, esta classificação ocorrer pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura – UNESCO. Cabe aqui ressaltar que num primeiro momento, é a própria comunidade quem atribui o valor patrimonial, e na sequência, cabe aos órgãos competentes, em suas diferentes esferas, reconhecer este valor.

Embora a questão cultural por si só já desperte bastante interesse da comunidade técnica, outro ponto bastante relevante (e complexo) do ponto de vista da engenharia, é que atualmente temos códigos e normas com expressões e conceitos que descrevem o comportamento das construções com materiais modernos, como é o caso do concreto armado. É possível, por exemplo, até estimar parâmetros físico-mecânicos como o módulo de elasticidade e calcular as frequências naturais de um elemento, por exemplo, tudo por intermédio de expressões numéricas já estabelecidas. Entretanto, quando analisamos as CH, nas quais se usam materiais e técnicas vernaculares, a realidade não é bem esta.

É bastante comum que numa abordagem no contexto da avaliação das CH o edificado final em questão seja o resultado de longos períodos de intervenções e/ou alterações nos sistemas estruturais e, portanto, deve ter seu comportamento estrutural considerado sob esta ótica. Como exemplo, a Igreja de São Lourenço, no Porto, teve seu período construtivo abrangido entre 1575-1709. E por este motivo se faz necessário estudar sistematicamente as propriedades estruturais destas edificações, considerando suas várias etapas construtivas.

O elevado tempo de exposição aos efeitos ambientais podem influenciar em alterações no desempenho do sistema estrutural ao longo do tempo e, em alguns casos, a ausência de medidas adequadas de manutenção ou *retrofitting* podem contribuir para o comportamento frágil destas construções, que conseqüentemente podem elevar o risco de falhas sob cenários ambientais dramáticos, como na ocorrência de terremotos, tufões, enchentes, entre

MONITORAMENTO DA SAÚDE ESTRUTURAL (MSE) E O PATRIMÔNIO

2.1. INTRODUÇÃO

Antes de se avançar diretamente aos assuntos relacionados ao patrimônio abordados nos capítulos posteriores deste livro, neste capítulo será dado um foco maior para o MSE, de modo a apresentar um completo estado da arte sobre este tema.

Ao passo em que a evolução das técnicas de MSE serão abordadas nesta seção, será possível observar que o MSE também pode ser agrupado no conjunto dos procedimentos de avaliação e caracterização não destrutiva. Sendo, numa maior conjuntura, caracterizado como a própria evolução das ferramentas de medição usadas nas abordagens não destrutivas.

Também é importante destacar que o termo “monitoramento” pode ser utilizado de forma mais ampla, e entendido como o próprio acompanhamento de um ou vários parâmetros que influenciam na durabilidade das estruturas. Entretanto, o termo



“Monitoramento da Saúde Estrutural”, adotado neste livro considera a ideia do emprego de técnicas não destrutivas, com frequência definida na aquisição de dados sobre um ou um conjunto de parâmetros da estrutura, em períodos curtos ou longos de aquisição, com o objetivo de se analisar o estado atual de danos da estrutura. Mais adiante, uma definição para este termo será apresentada.

Também, se decidiu pela elaboração de um estado da arte pela necessidade de difusão do MSE, especialmente no Brasil, e pela ausência de referências bibliográficas sobre o tema em língua portuguesa. Foi ainda considerado que o MSE tem sido rapidamente difundido, e é, atualmente, uma ferramenta de destaque e que está a consolidar-se em abordagens de avaliações estruturais focadas no patrimônio histórico. Embora as raízes do MSE remontem aos anos 60, consideráveis avanços só ocorrem após os anos 2000, devido aos avanços das ferramentas computacionais e nos sistemas sensoriais.

2.2. MUDANÇA DE FOCO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: DE “NOVA CONSTRUÇÃO” PARA “REABILITAÇÃO”

Estima-se que a população mundial seja da ordem de 7 bilhões de pessoas, e a previsão é que até 2100 este número seja de 11,2 bilhões (ZHANG *et al.*, 2006). De fato, o crescimento populacional eventualmente resultará numa demanda por novas habitações. No entanto, considerando o cenário atual das mudanças climáticas e sua influência na probabilidade de ocorrência de desastres naturais, este crescimento habitacional está, portanto, condicionado pela necessidade de desenvolvimento de novas construções com menor impacto ambiental; e também pela necessidade de reabilitação das construções existentes, adaptadas as novas necessidades dos usuários. Consequentemente, novos materiais serão desenvolvidos e introduzidos na indústria da construção, assim como novas medidas de reabilitação e intervenção deverão ser implementadas neste período.

GUIA PARA AVALIAÇÃO DE CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS

3.1. INTRODUÇÃO

As CH desempenham um papel relevante na sociedade contemporânea. Isso porque elas são a representação física de parte da história de suas comunidades e, por vezes, evidenciam, além da vida cotidiana das comunidades passadas, os avanços no desenvolvimento da história da humanidade. Essas construções podem ter um valor de conjunto, como o centro histórico da cidade do Porto, formado por um conjunto de casas vernaculares datadas algumas do século XIII, ou valor individual, como o Coliseu Romano, que por si só é um denso registro das atividades desenvolvidas na atual região da Itália entre os séculos I e VI (Figura 12).

A valorização do patrimônio cultural imóvel associado aos critérios de autenticidade tem motivado o desenvolvimento de técnicas de apoio à manutenção, recuperação e conservação destas construções. Adicionalmente, a inclusão das CH como parte ativa das cidades nas últimas décadas tem acelerado ainda mais o desenvolvimento de técnicas de preservação (LOURENÇO, 2014).



(a)



(b)

FIGURA 12. Construções históricas à margem do Rio Douro, em Porto, e b) Coliseu Romano, Roma, Itália.

Reabilitar as CH e torná-las parte ativa no contexto econômico local, seja na forma de museus ou na forma de hotéis, ou ainda de restaurantes ou residências, pode ser uma grande oportunidade de desenvolvimento econômico para as comunidades. Na Europa, o turismo cultural tem uma grande importância no setor econômico. Assim, considerar as CH, independentemente de serem classificadas (ou tombadas), como estruturas frágeis, vulneráveis ou símbolos do atraso, constitui uma visão bastante equivocada das potencialidades destas construções que, uma vez bem mantidas, podem apresentar condições de segurança, iguais ou até superiores as das construções contemporâneas. Um estudo realizado por Varum *et al.* (2006) demonstrou que técnicas de reforço estrutural podem ser aplicadas as CH de modo a não comprometerem as características construtivas da construção e garantir que os limites de segurança da construção estejam dentro dos limites de segurança aceitáveis para os códigos atuais.

Neste sentido, o processo de reabilitação das CH é interessante por que permite a adequação destas construções às novas necessidades dos usuários, e reduz a necessidade de que novos edifícios sejam construídos, colaborando para a valorização da cultura local e para a sustentabilidade, através da preservação destas construções, contribuindo ainda para o desenvolvimento e fortalecimento do turismo local.

EFEITO DA TEMPERATURA EM ESTRUTURAS DE ALVENARIA

4.1. INTRODUÇÃO

Avanços recentes no campo de sistemas sensoriais e comunicações sem fio, bem como sua redução de custos de implementação, contribuíram significativamente para a disseminação e o emprego do MSE como ferramenta de apoio à caracterização e avaliação de segurança estrutural (FARRAR; WORDEN, 2007b; LYNCH, 2006).

De fato, sistemas sensoriais com microprocessadores embutidos e comunicação sem fio representam uma profunda mudança no modo como as estruturas são avaliadas, monitoradas e controladas (SPENCER; RUIZ-SANDOVAL; KURATA, 2004), levando em conta que essas técnicas permitem o acesso remoto, e em tempo real aos parâmetros monitorados.

Nas últimas duas décadas, um número considerável e elevado de casos de emprego de MSE em diferentes estruturas civis (pontes, torres e edifícios) foi reportado na literatura (SOHN *et al.*, 2004; WENZEL, 2009), superando várias questões técnicas, enquanto que poucos casos de MSE aplicado ao patrimônio tem sido relatados, especialmente fora da Europa (MESQUITA *et al.*, 2016a).



Além da complexidade e variabilidade construtiva das construções patrimoniais, que exige avanços nas estratégias de monitoramento e nos métodos de processamento de dados, os dados oferecidos pelo sistema de MSE, precisam ser discutidos com informações sobre o estado atual e no contexto do comportamento global em serviço da estrutura. Além disso, é importante ressaltar que todas as estratégias empregadas para caracterização e avaliação devem ser conduzidas com relação ao valor histórico da construção e sem provocar novos surgimentos de danos, como preconiza o ICOMOS (2003). A fim de apresentar desenvolvimentos recentes no campo do MSE, relacionados com o CH, alguns casos relatados na literatura serão resumidos e discutidos a seguir.

Em Zonta *et al.* (2010) a Torre *Aquila*, uma torre medieval localizada na cidade de Trento, Itália, com obras de arte valiosas, foi instrumentada com acelerômetros, sensores de deslocamento relativo, e sensores de temperatura e umidade relativa. Os sensores foram conectados ao sistema de aquisição de dados que envia as informações coletadas para uma plataforma remota através de comunicação sem fio. Basicamente, o sistema de MSE estava focado em fornecer informações sobre as vibrações e deslocamentos da torre, bem como a influência dos efeitos ambientais nas medições. O trabalho também demonstra como as informações coletadas podem ser usadas para prever situações anômalas do comportamento da torre em serviço.

Segundo Samuels *et al.* (2011), a inclinação das paredes de uma igreja histórica de madeira em reabilitação foi monitorada por meio de uma rede simplificada de sensores sem fio e, mesmo com a baixa sensibilidade dos modos sensoriais, o sistema implementado foi capaz de identificar tendências de longo prazo na inclinação das paredes da igreja. Em Lima *et al.* (2008), um sistema sensorial composto por 19 sensores de deslocamento de fibra ótica e 5 sensores de temperatura foi empregado para monitorar os danos na Santa Casa de Misericórdia de Aveiro, e os dados coletados foram usados para atualizar um modelo de elementos finitos para avaliar a estado de dano da igreja.

CARACTERIZAÇÃO ULTRASSÔNICA DE PAINÉIS DE ALVENARIAS HISTÓRICAS

5.1. INTRODUÇÃO

Especialmente devido à necessidade de mais informações sobre as propriedades e sobre o comportamento das construções históricas, trabalhos sobre a caracterização do comportamento dessas construções vêm sendo reportados na literatura de modo crescente (BOSCATO *et al.*, 2016; BRANDÃO *et al.*, 2018; CERAVOLO *et al.*, 2014; MESQUITA *et al.*, 2018a).

Nota-se que foram feitos alguns esforços para que END possam ser utilizados para apoiar a avaliação estrutural de construções do patrimônio, como por exemplo, o emprego de métodos vibracionais, avanços em estratégias de modelos numéricos, ou pela aplicação de monitoramento técnicas (BARRACA *et al.*, 2016; LOURENÇO, 1996; MESQUITA *et al.*, 2016a; MIRANDA *et al.*, 2012; RAMOS *et al.*, 2010).

Dentre os END, os testes sônicos são os mais aplicados em todo o mundo para caracterizar a variabilidade das paredes de



alvenaria. Na verdade, a caracterização de alvenarias é sempre uma tarefa difícil devido à sua variabilidade de tipologias e propriedades anisotrópicas (MIRANDA, 2011).

No trabalho apresentado por Miranda (MIRANDA, 2011), por exemplo, testes sônicos foram empregados para caracterizar a variabilidade dos materiais das paredes da Catedral de *Noto* (Itália). Para tanto, transdutores foram colocados dispostos diretamente na alvenaria, em lados oposto ao ponto de excitação, distribuídos ao longo do perímetro das paredes, sem nenhuma camada de regularização. Como resultado, foi possível identificar e caracterizar a forma como a heterogeneidade das paredes de alvenaria pode influenciar as velocidades sônicas coletadas. De uma perspectiva global, o teste sonoro permitiu a detecção das variações ao longo das paredes analisadas e contribuiu para uma análise com sucesso da qualidade das paredes.

A seguir, o trabalho apresentado por Binda *et al.* (2001) realizado no templo de *S. Nicolò l' Arena* (Itália), mostra um caso interessante de aplicação de testes sônicos para caracterização de elementos de alvenaria de tijolo. Uma cuidadosa inspeção visual foi feita focando as colunas, e seus principais danos, essencialmente fissuras, foram identificadas e, em seguida, foram realizados ensaios de *flat-jack*. Os resultados do teste sônico foram processados e as tomografias sônicas foram obtidas, e a seção interna das colunas foi caracterizada qualitativamente. A combinação entre inspeção visual, tomografias sônicas e os resultados dos ensaios de *flat-jack* permitiu à equipe técnica compreender os aspectos de comportamento e heterogeneidade das colunas.

Em relação ao emprego de testes sônicos para caracterização de alvenarias, um passo adiante foi dado por Miranda *et al.* (2012), onde os autores desenvolveram uma nova técnica para caracterização de alvenarias de pedra, precisamente indiretos do método de impacto sônico (ISIM, sigla em inglês para *Indirect Sonic Impact Method*). Os autores realizaram um extenso programa experimental em paredes de alvenaria de pedra, e as velocidades sônicas

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS COM RECURSO À MÉTODOS DINÂMICOS

6.1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de desastres naturais pode afetar gravemente a segurança estrutural das CH, e ocasionalmente provocar o colapso total da estrutura ou, em menor grau, induzindo o surgimento de danos e influenciar sua progressão. Neste sentido, a adoção de intervenções preventivas pode garantir uma potencial diminuição do risco de segurança da estrutura e evitar perdas dramáticas (PARISI; AUGENTI, 2013).

Todavia, adotar procedimentos de intervenção em CH requer um profundo conhecimento sobre o comportamento estrutural do edificado, que devido à heterogeneidade e complexidade do sistema construtivo, torna necessário, em muitos os casos, o desenvolvimento de um estudo específico para cada exemplar do

patrimônio histórico, especialmente se o sistema estrutural for de alvenaria portante.

Adicionalmente, enquanto estudos de natureza numérica e experimental sobre as características dos elementos de concreto armado têm sido desenvolvidos exaustivamente, o que permitiu, por exemplo, elaborar metodologias de projeto e estimar com certa precisão as características da estrutura em função das propriedades físicas e mecânicas do concreto, como demonstrado no Eurocódigo 8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005), no caso das CH suas propriedades são majoritariamente caracterizadas numa abordagem caso-a-caso, frequentemente com recorrência a métodos de ensaios dinâmicos (CIMELLARO; STEFANO, 2014; GATTULLI; LEPIDI; POTENZA, 2016; GENTILE; SAISI, 2007) e de MSE (DE STEFANO; MATTA; CLEMENTE, 2016; MESQUITA *et al.*, 2016b; SAMUELS *et al.*, 2011), tem demonstrado que este é um campo atual e significativo, e que demanda maiores esforços da comunidade técnica.

Enquanto que ensaios dinâmicos podem ser consideradas ferramentas poderosas para a obtenção de informação sobre a resposta sísmica e a vulnerabilidade da estrutura, o emprego de ensaios localizados (pontuais) e sistemas de MSE podem garantir a oferta de informação mais precisa sobre as características das CH. Mesmo com o aumento do número de casos reportados na literatura sobre aplicação do MSE em CH nos últimos 10 anos, em que se estima um crescimento de 60% nos casos reportados (MESQUITA *et al.*, 2016c), a lacuna no conhecimento técnico-científico sobre metodologias de avaliação em tempo real capazes de fornecer aos proprietários respostas objetivas sobre a atual condição de CH, particularmente para evitar perdas dramáticas, ainda é notória. Portanto, esforços adicionais da comunidade técnico-científica são essenciais para superar a lacuna nesta área do conhecimento.

De acordo com Boscato (2016), o MSE de CH é uma oportunidade desafiadora no campo do monitoramento devido à necessidade de se entender a tipologia estrutural e a verificação das hipóteses