

Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC
Escola de Engenharia da UFMG
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
<http://www.fumec.br/revistas/construindo/index>

ISSN 2318-6127 (online)
ISSN 2175-7143 (impressa)
Recebido em 05/06/2019
Aceito em 26/06/2019

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS USADOS NA INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS DE ALVENARIA DE PEDRA

NON-DESTRUCTIVE TESTS USED IN THE INSPECTION AND DIAGNOSIS OF STONE MASONRY HISTORICAL BUILDINGS

Carlos Chastre

Prof. Associado, CERIS e FCT, Universidade NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal
chastre@fct.unl.pt

Marco Ludovico-Marques

Prof. Adjunto, INCITE, ESTB, I. P. de Setúbal, Lavradio, Portugal
ludovicomarques@gmail.com

Hugo Biscaia

Investigador, UNIDEMI, FCT, Universidade NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal
hb@fct.unl.pt

RESUMO

Ao longo da sua vida útil os edifícios históricos estão sujeitos a alterações de uso, a agentes ambientais e a diferentes ações como assentamentos do solo, incêndios, inundações ou sismos, para os quais podem não estar preparados. Além disso, a falta de manutenção contínua ajuda a colocar grande parte desse património em risco devido a problemas estruturais que reduzem sua própria segurança e a dos seus utilizadores. A preservação e mitigação de riscos do património cultural construído requer o uso de ferramentas confiáveis, a fim de avaliar o seu estado de conservação e identificar e prevenir potenciais vulnerabilidades. Os testes destrutivos tradicionais não são possíveis de realizar na maioria dos edifícios históricos, por isso é necessário selecionar testes não destrutivos (NDT) que permitam a caracterização física e mecânica dos materiais e do comportamento da estrutura. Neste artigo apresenta-se uma visão geral de diferentes equipamentos e testes NDT que permitem o levantamento geométrico e o mapeamento dos danos do edifício, a análise petrográfica da pedra de alvenaria, a caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais e o comportamento estrutural do edifício.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos, END, edifícios históricos, alvenaria de pedra.

ABSTRACT

The historic buildings may be subjected to changes in their use, environmental actions, soil settlements and natural hazards in their lifetime, such as fires, floods, or earthquakes, for which they may not be prepared. In addition, the lack of continuous maintenance helps to put much of this heritage at risk because of structural problems that reduce its own safety and that of its users. The preservation and mitigation of risks of built cultural heritage requires the use of reliable tools in order to assess their conservation status and identify and prevent potential vulnerabilities. Traditional destructive tests are not possible in most historical buildings, so it is necessary to select non-destructive tests (NDT) that allow the physical and mechanical characterization of the materials and the behaviour of the structure. This article presents an overview of different equipment and NDT tests that allow the geometric survey and mapping of building damages, the petrographic analysis of masonry stones, the

characterization of physical and mechanical properties of materials and the structural behaviour of the building.

Keywords: Non-destructive tests, NDT, historical buildings, stone masonry.

1. INTRODUÇÃO

Existe atualmente uma ampla gama de testes que podem ser utilizados no apoio à inspeção e avaliação de edifícios. Contudo, se quisermos ter total respeito pela integridade física dos edifícios históricos e limitar ao máximo o grau de intrusão no património, seguindo os princípios da salvaguarda do património arquitetónico (Faria and Chastre, 2015), que foram definidos nas cartas internacionais de Atenas e Veneza (ICOMOS, 2004), não é possível colher amostras com dimensões semelhantes às obtidas em edifícios correntes para a caracterização de materiais. Por esta razão, um conjunto variado de métodos e testes não destrutivos (NDT) são utilizados isolados ou em combinação com outros métodos, a fim de caracterizar os materiais e a estrutura do edifício em estudo.

2. MÉTODOS E TESTES NÃO DESTRUTIVOS EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

Neste capítulo apresentam-se os principais métodos e testes NDT baseados na experiência dos autores e no levantamento da literatura aplicáveis à caracterização de materiais e das estruturas de edifícios históricos. Na secção 2.1, são indicados os métodos utilizados para a obtenção da geometria e do mapeamento de danos nos edifícios históricos em análise. Na secção 2.2 apresentam-se os métodos e ensaios utilizados para caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais e outros aspetos estruturais, enquanto na secção 2.3 mostram-se os testes utilizados para avaliar as propriedades físicas dos materiais. Finalmente, na secção 2.4 descrevem-se os principais métodos e testes utilizados na análise petrográfica.

2.1. Métodos NDT para obtenção da geometria e do mapeamento de danos

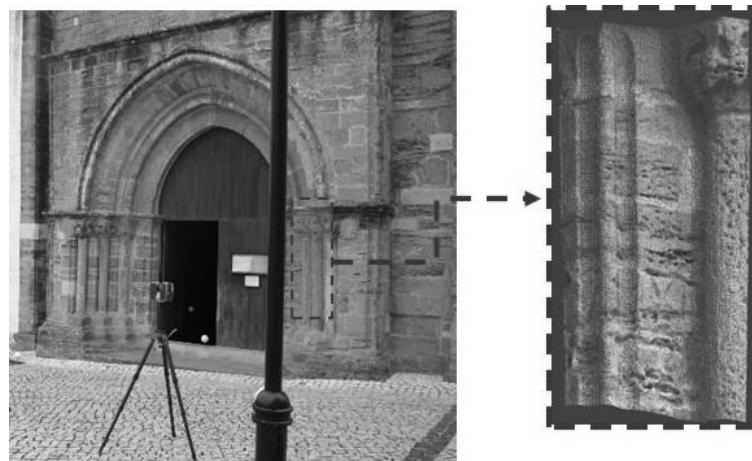
A inspeção do edifício histórico começa com uma inspeção visual (McCann and Forde, 2001, Heidari et al., 2017b, Heidari et al., 2017a) do mesmo, seguido de um levantamento exaustivo das anomalias e da sua identificação (e quantificação, se possível), bem como da respetiva localização em planta e alçados. Todos esses passos são acompanhados por um registo fotográfico (Menéndez, 2016, Heidari et al., 2017b, Heidari et al., 2017a). Para fazer o levantamento tridimensional do edifício em estudo, é possível utilizar a fotogrametria (Török, 2010, Yastikli, 2007) ou o varrimento laser 3D (Figura 1) (Chastre et al., 2014).

O levantamento geométrico do edifício histórico é um dado importante para a avaliação do comportamento estrutural do mesmo e o mapeamento dos danos existentes e é um complemento valioso na avaliação do estado de degradação da construção. Além da observação visual e do relatório fotográfico, uma variedade de outros métodos e equipamentos podem ser utilizados na observação e mapeamento do edifício em estudo.

Figura 1 - Vista da fachada principal da Igreja de S. Leonardo na Atouguia da Baleia, Portugal, levantamento utilizando o varrimento laser 3D (Chastre et al., 2014).



Figura 2 - Levantamento utilizando o varrimento laser 3D (Chastre et al., 2014).



Esses métodos podem incluir o uso de equipamento de varrimento laser 3D (Jones, 2011, Chastre and Ludovico-Marques, 2017, Hinzen et al., 2013, Chastre et al., 2014) para examinar as fachadas do edifício e detetar padrões de degradação, vazios (Figura 2) e fendas após a análise das imagens digitais; o uso de uma Estação Total ou Taqueómetro (Lignola and Manfredi, 2010, Husnul and Cahyono, 2016) para monitorizar as fachadas do edifício e fornecer informação acerca da deformação tridimensional da estrutura, permitindo quantificar

o nível de deslocamentos numa análise pós-levantamento. A fim de detetar diferentes materiais, destacamentos, vazios, fendas e outros tipos de danos em diferentes profundidades nas paredes de alvenaria dos edifícios históricos, é possível usar uma câmara termográfica de infravermelhos (IRT) (Avdelidis and Moropoulou, 2004, Faella et al., 2012), um equipamento de ultra-sons (Vasconcelos et al., 2008, Riveiro and Solla, 2016) ou os dispositivos de emissão acústica (AE) (Wevers, 1997, Pérez-Gracia et al., 2016). Além disso, o Georadar (GPR) (Lignola and Manfredi, 2010, Pérez-Gracia et al., 2013) é um outro equipamento adequado para detetar diferentes materiais e obter a sua forma, bem como, vazios, fendas, presença de água e a definição da estrutura interna da parede de alvenaria. Em estruturas de alvenaria, é possível observar o interior de cavidades e fendas através de um boroscópio (Masciotta et al., 2016). Este equipamento também é utilizado para recolher informação sobre a profundidade da camada externa de pedra natural ou sobre o material de preenchimento entre as camadas. Para adquirir imagens ampliadas "in situ" das superfícies, pode ser usado um microscópio de fibra ótica (FOM) (Moropoulou et al., 2013a, Cheilakou et al., 2012). A inspeção e o levantamento aéreo de edifícios utilizando fotografia e vídeo podem também ser realizados através de sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) com uma câmara integrada (Campana, 2017, Aguilar et al., 2016), popularmente conhecidos como “drones”. O Quadro 1 apresenta um resumo dos métodos NDT utilizados para obter a informação geométrica e o mapeamento dos danos em edifícios históricos.

Quadro 1 – Resumo dos métodos NDT para o levantamento geométrico e o mapeamento de danos (adaptado (Chastre and Ludovico-Marques, 2018))

Tipo	Método/ Equipamento	Referências
Observação e mapeamento	■ Observação Visual	(McCann and Forde, 2001, Heidari et al., 2017b, Heidari et al., 2017a)
	■ Fotografia	(Menéndez, 2016, Heidari et al., 2017b)
	■ Varrimento Laser 3D	(Jones, 2011, Chastre and Ludovico-Marques, 2017, Hinzen et al., 2013, Chastre et al., 2014)
	■ Estação Total ou Taqueómetro	(Lignola and Manfredi, 2010, Husnul and Cahyono, 2016)
	■ Câmara termográfica de infravermelhos (IRT))	(Avdelidis and Moropoulou, 2004, Faella et al., 2012)
	■ Velocidade de Ultra-Sons (UPV)	(Vasconcelos et al., 2008, Riveiro and Solla, 2016)
	■ Emissão Acústica (AE)	(Wevers, 1997, Pérez-Gracia et al., 2016)
	■ Georadar (GPR)	(Lignola and Manfredi, 2010, Pérez-Gracia et al., 2013)
	■ Microscópio de fibra ótica (FOM)	(Moropoulou et al., 2013a, Cheilakou et al., 2012)

	■ Boroscópio	(Masciotta et al., 2016)
	■ Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS)	(Campana, 2017, Aguilari et al., 2016)
Modelos 3D	■ Fotogrametria	(Török, 2010, Yastikli, 2007)
	■ Varrimento Laser Terrestre/ Varrimento Laser 3D	(Jones, 2011)

2.2. Métodos utilizados na análise petrográfica

O desgaste químico das pedras de construção ocorre dentro de uma escala de tempo geológico muito além do tempo histórico das construções antigas, ressaltando a dissolução ácida dos materiais carbonatados e a sulfatação das superfícies de pedra devido à poluição industrial. Minerais secundários (por exemplo, argilas, óxidos e hidróxidos de ferro) só podem ocorrer como alteração herdada em rochas ornamentais recolhidas de pedreiras e usadas como materiais de construção de baixa qualidade. À medida que a alteração das pedras de construção continua, mudanças graduais ocorrem essencialmente nas propriedades físicas e mecânicas das rochas, de modo que a alteração se pode considerar resultante essencialmente da atuação de processos físicos e mecânicos.

A análise petrográfica é uma ferramenta importante para estudar a composição mineralógica e química de pedras em edifícios históricos e para monitorizar a evolução da alteração química, que é hoje resultado da dissolução ácida de materiais carbonatados e da sulfatação de superfícies de pedra devido à poluição industrial. A análise petrográfica permite também a identificação e quantificação de minerais de alteração hereditária existentes na construção de blocos de pedra de baixa qualidade. A análise petrográfica também desempenha um papel importante, monitorizando a alteração física e permitindo a determinação do tamanho dos poros e da distribuição espacial da forma, sendo muito útil para a identificação de sais cristalizados nas eflorescências. A análise petrográfica é um procedimento essencial para obter a assinatura intrínseca da pedra utilizada na construção de edifícios e monumentos históricos, permitindo ensaios destrutivos em afloramentos semelhantes localizados nas suas proximidades, contribuindo para a manutenção da integridade física dos monumentos, de acordo com as cartas de Atenas e Veneza (ICOMOS, 2004). No Quadro 2 é apresentado um resumo dos métodos utilizados na análise petrográfica.

A análise petrográfica pode ser realizada a um nível macroscópico ou microscópico. Ao nível macroscópico, uma observação visual da amostra de mão é usual para uma classificação

preliminar, com a utilização da lupa de bolso para ampliar a pedra e permitir a observação da textura e estrutura da pedra e dos seus minerais. A observação visual das amostras de mão permite a identificação das cores da superfície usando o sistema de cores Munsell ou os parâmetros CIELAB e a caracterização da composição mineralógica da pedra. Num nível microscópico é possível ter a definição da composição mineral e o seu arranjo geométrico de textura e estrutura através de lâminas delgadas de pedra observadas por microscopia petrográfica (EN12407, 2006), em amostras pequenas (até 1 cm³) através do SEM-EDS (Ion et al., 2016, Morillas et al., 2016) ou do XRD (Bitossi et al., 2005, Ion et al., 2016).

A identificação dos minerais ou dos grupos químicos ou iões (por exemplo, sulfatos) e a sua extensão em amostras por análise química pode também ser obtida usando AAS, ED XRF, LRS, FTIR, LIBS. Segundo Bitossi et al. (Bitossi et al., 2005) o XRF (espectroscopia de fluorescência de raios X) e EDXRF (espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia) estão entre as técnicas mais importantes para análise qualitativa e semi-quantitativa de elementos numa amostra. Com este propósito, têm sido amplamente utilizados os sistemas portáteis de XRF para análises in-situ não destrutivas.

Quadro 2 – Resumo dos métodos utilizados na análise petrográfica (adaptado de (Chastre and Ludovico-Marques, 2018))

Tipo de Caraterísticas	Método/ Equipamento	Referências
Macroscópicas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Observação visual, amostras de mão ■ Lupa de bolso 	
Microscópicas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Microscópio Petrográfico ■ Microscópio eletrónico de varrimento com espectómetro de dispersão de energia (SEM-EDS) ■ Difração de raios X (XRD) ■ Espectroscopia de absorção atómica (AAS) ■ Espectrómetro de fluorescência de Raio X com dispersão de energia (ED XRF) ■ Espectroscopia Laser Raman (LRS) ■ Espectroscopia de infravermelhos por transformada de Fourier (FTIR e μFTIR) ■ Espectroscopia de emissão atómica com raio laser de energia elevada (LIBS) 	<p>(EN12407, 2006)</p> <p>(Ion et al., 2016, Morillas et al., 2016)</p> <p>(Bitossi et al., 2005, Ion et al., 2016)</p> <p>(Janssens and Van Grieken, 2004)</p> <p>(Bitossi et al., 2005, Ion et al., 2016)</p> <p>(Bitossi et al., 2005, Ion et al., 2016)</p> <p>(Bitossi et al., 2005, Ion et al., 2016)</p> <p>(Senesi et al., 2016)</p>

2.3. Métodos NDT para caracterização das propriedades físicas dos materiais

Na avaliação da conservação dos edifícios históricos é fundamental caracterizar as propriedades físicas de seus materiais, sendo os métodos NDT bem conhecidos como alternativas para essa caracterização. Os métodos NDT permitem a determinação de propriedades físicas "in situ" ou por correlação, tais como a absorção de água (Chastre and Ludovico-Marques, 2018, Vandevoorde et al., 2013, Menéndez, 2016, Miloš and Zuzana, 2013, Svahn, 2006), a humidade (Menezes et al., 2015, Török, 2010, Svahn, 2006, Paoletti et al., 2013, Paipetis et al., 2012, Siegesmund and Snethlage, 2011), a permeabilidade (Menéndez, 2016, Brown and Smith, 2013, Katz and Thompson, 1986), a temperatura (Paipetis et al., 2012), o teor em sal (Morillas et al., 2016, Svahn, 2006, Borrelli and Umland, 1999, Bläuer Böhm, 2005, Ludovico-Marques et al., 2005), a densidade aparente (Török, 2010, Ludovico-Marques, 2008, EN1936, 2006, Siegesmund and Snethlage, 2011), a porosidade (Siegesmund and Snethlage, 2011, Vasconcelos et al., 2008, Ludovico-Marques and Chastre, 2014b, Ludovico-Marques, 2008, Ludovico-Marques and Chastre, 2012, Ludovico-Marques et al., 2012, EN1936, 2006, Borrelli and Umland, 1999, Anselmetti et al., 1998), a compactidade (da Porto et al., 2013), a coesão de superficial (Menezes et al., 2015), a rugosidade da superfície (Snethlage and Sterflinger, 2011, Birginie and Rivas, 2005, Carmen et al., 2012), a dureza superficial (Siegesmund and Snethlage, 2011, Vasanelli et al., 2017, Viles et al., 2011, Coombes et al., 2013, Ferreira Pinto and Delgado Rodrigues, 2012), refletância (Török, 2010), bem como a cor (Fairchild, 2013, Shevell, 2003, Munsell, 1915).

No Quadro 3 apresenta-se um resumo dos métodos NDT utilizados para medir as propriedades físicas dos materiais de construção dos edifícios históricos. O laboratório de testes portátil utilizado no método de Ludovico-Marques (Ludovico-Marques, 2008) é mostrado na Figura 3, enquanto na Figura 4 é apresentada uma campânula de vácuo para a determinação da porosidade pelo princípio de Arquimedes, e a imagem de um Porosímetro de Mercúrio por Intrusão (MIP) também utilizado para a determinação da porosidade de amostras de materiais.

Figura 3 - Laboratório de testes portátil usado no método Ludovico-Marques (Ludovico-Marques, 2008).



Figura 4 - Campânula de vácuo utilizado na determinação da porosidade pelo princípio de Arquimedes e porosímetro de mercúrio por intrusão (MIP) (fonte FCT NOVA).



Quadro 3 – Resumo dos métodos NDT para caracterização das propriedades físicas dos materiais de construção históricos (adaptado de (Chastre and Ludovico-Marques, 2018))

Prop. Físicas	Método/ Equipamento	Referências
Absorção de água	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tubo de Karsten ■ Tubo de Mirowski ■ Pipeta Italiana ■ Teste de Esponja de Contato ■ Sistema de micro-tubo digital ■ Método de determinação da permeabilidade em câmara sobre parede 	<p>(Chastre and Ludovico-Marques, 2018)</p> <p>(Vandevorde et al., 2013)</p> <p>(Menéndez, 2016)</p> <p>(Vandevorde et al., 2013)</p> <p>(Miloš and Zuzana, 2013)</p> <p>(Svahn, 2006)</p>
Humidade	<ul style="list-style-type: none"> ■ Medidor de Humidade ■ Condutímetro ■ Ressonância Magnética Nuclear Portátil (NMR) ■ Medidor portátil de humidade por radar e microndas ■ Medidor portátil de humidade por emissão de neutrões ■ Métodos Gravimétricos ■ Métodos Químicos ■ Câmara Termografia de Infravermelhos (IR) 	<p>(Menezes et al., 2015)</p> <p>(Török, 2010)</p> <p>(Siegesmund and Sneathlge, 2011)</p> <p>(Svahn, 2006)</p> <p>(Vandevorde et al., 2013)</p> <p>(Svahn, 2006)</p> <p>(Svahn, 2006)</p> <p>(Paoletti et al., 2013)</p>
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sensores de Temperatura 	<p>(Paipetis et al., 2012)</p>
Permeabilidade	<ul style="list-style-type: none"> ■ Método do fluxo transiente ■ Método de Katz e Thompson 	<p>(Brown and Smith, 2013)</p> <p>(Katz and Thompson, 1986)</p>
Teor de sal	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fluorescência de Raio X em dispersão de energia 	<p>(Morillas et al., 2016)</p>

	(EDXRF)	
	■ Método de Bläuer Böhm	(Bläuer Böhm, 2005)
	■ Método de Borrelli	(Svahn, 2006, Borrelli and Urland, 1999)
	■ Método de Ludovico-Marques	(Ludovico-Marques et al., 2005)
Densidade aparente	■ Sonda de emissão de ultrassons em superfícies planares	(Török, 2010)
	■ Velocidade Ultra-Sons (UPV)	(Siegesmund and Snethlage, 2011, EN1936, 2006)
	■ Princípio de Arquimedes	(Ludovico-Marques, 2008, EN1936, 2006)

Quadro 3 – Resumo dos métodos NDT para caracterização das propriedades físicas dos materiais de construção históricos (adaptado de (Chastre and Ludovico-Marques, 2018))
[Continuação]

Prop. Físicas	Método/ Equipamento	Referências
Porosidade	■ Velocidade de Ultra-Sons (UPV)	(Siegesmund and Snethlage, 2011, Vasconcelos et al., 2008)
	■ Porosímetro de Mercúrio (MIP)	(Ludovico-Marques, 2008, Siegesmund and Snethlage, 2011)
	■ Princípio de Arquimedes	(Ludovico-Marques, 2008, EN1936, 2006)
	■ Microscópio Petrográfico	(Anselmetti et al., 1998)
	■ Método de Adsorção de Nitrogénio (BET)	(Borrelli and Urland, 1999)
Compacidade	■ Velocidade de propagação das ondas elásticas	(da Porto et al., 2013)
Coesão da superfície	■ Fitas adesivas para remoção de películas superficiais	(Menezes et al., 2015)
Rugosidade da superfície	■ Rugosímetro ótico portátil	(Snethlage and Sterflinger, 2011)
	■ Perfilómetro portátil	(Carmen et al., 2012)
	■ Varrimento Laser 3D	(Birginie and Rivas, 2005)
Dureza da superfície	■ Martelo de Schmidt ou Esclerómetro	(Vasanelli et al., 2017)
	■ Teste de dureza (Duroscope)	(Siegesmund and Snethlage, 2011)
	■ Teste de dureza dinâmica (Equotip)	(Coombes et al., 2013, Viles et al., 2011)
	■ Teste de dureza de indentação	(Siegesmund and Dürrast, 2011)
	■ Esclerómetro de Martens	(Ferreira Pinto and Delgado Rodrigues, 2012)
Refletância superfície	■ Refletómetro	(Török, 2010)
Cor	■ Sistema de Cor Munsell	(Munsell, 1915)
	■ CIELAB	(Fairchild, 2013)
	■ Colorímetros e espectrocolorímetros	(Shevell, 2003)

2.4. Métodos NDT para caracterização das propriedades mecânicas das paredes de alvenaria e do comportamento estrutural do edifício

Tradicionalmente, quando se pretende conhecer as propriedades de um determinado material da estrutura, são recolhidas amostras para realizar ensaios mecânicos no laboratório e obter a

resistência à compressão, à tração ou o módulo de elasticidade desse material. No entanto, em edifícios históricos pretende-se o menor grau de intrusão possível, pelo que a alternativa nestas situações é utilizar os métodos NDT. Os testes destrutivos permitem avaliar diretamente as propriedades estudadas, diferentemente dos testes não destrutivos, para os quais é necessário o uso de correlações empíricas. Na análise dos edifícios históricos, deve-se salientar que os resultados obtidos para um elemento não podem ser extrapolados para os demais, devido à variabilidade entre os elementos. A fim de ter resultados confiáveis da caracterização mecânica, é necessária uma quantidade significativa de testes NDT em diferentes elementos e é necessário ter correlações empíricas calibradas com testes destrutivos realizadas com materiais e condições semelhantes. Sempre que possível, os resultados devem ser verificados usando diferentes testes.

A partir dos métodos NDT é possível caracterizar as propriedades mecânicas das paredes de alvenaria e o comportamento estrutural, podendo-se estimar a resistência à compressão (Vasanelli et al., 2017, Siegesmund and Sneathlge, 2011, Török, 2010, Coombes et al., 2013, Viles et al., 2011, Vasconcelos et al., 2008, Ludovico-Marques, 2008, Svahn, 2006, Chastre and Ludovico-Marques, 2017, Ludovico-Marques and Chastre, 2014a, Ludovico-Marques and Chastre, 2016, Ludovico-Marques et al., 2012, Shalabi et al., 2007) e à tração (Vasconcelos et al., 2008, Martínez-Molina et al., 2014, Martínez et al., 2013, Botas et al., 2017), a aderência (Miccoli et al., 2014, Botas et al., 2017), o módulo de elasticidade (da Porto et al., 2013, RILEM, 2004b, RILEM, 2004a, EN14146, 2006, Pinho, 2007), o nível de tensão instalado “in situ” e o comportamento tensão-deformação (da Porto et al., 2013, RILEM, 2004b, RILEM, 2004a), o nível de deslocamentos (Binda et al., 2000, Glisic et al., 2007, Ohtsu, 2016, Lignola and Manfredi, 2010, Husnul and Cahyono, 2016, Almeida et al., 2016, Busse et al., 2008, Colla and Gabrielli, 2017), a frequência natural e os modos de vibração da estrutura (McCann and Forde, 2001, Miranda et al., 2012, Masciotta et al., 2016, Carvalho, 2015). Um resumo dos métodos NDT para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais e outros aspetos estruturais em edifícios históricos é apresentado no Quadro 4.

A Figura 5 mostra à esquerda um teste utilizando um sistema de medição da resistência à perfuração em profundidade (DRTMS) numa parede de pedra (Ludovico-Marques, 2008) e à direita um teste de velocidade de ultra-sons (UPV) realizado numa parede de alvenaria (Pinho, 2007). Por sua vez, a Figura 6 mostra a configuração de um teste de vibração ambiental realizado no arco da R. Augusta em Lisboa (Carvalho, 2015).

Quadro 4 – Resumo dos métodos NDT para caracterização das propriedades mecânicas dos materiais e do comportamento estrutural do edifício (adaptado de (Chastre and Ludovico-Marques, 2018))

Parâmetros	Método/ Equipamento	Referências
Resistência à compressão / Dureza da superfície	■ Martelo de Schmidt ou Esclerómetro	(Vasanelli et al., 2017, Shalabi et al., 2007)
	■ Teste de dureza (Duroscope)	(Siegesmund and Snethlage, 2011, Török, 2010)
	■ Teste de dureza dinâmica (Equotip)	(Coombes et al., 2013, Viles et al., 2011)
	■ Velocidade de Ultra-Sons (UPV)	(Siegesmund and Snethlage, 2011, Vasconcelos et al., 2008)
	■ Resistência à perfuração em profundidade (DRMS)*	(Ludovico-Marques, 2008, Svahn, 2006)
	■ Porosidade acessível	(Ludovico-Marques and Chastre, 2014a, Ludovico-Marques and Chastre, 2016, Ludovico-Marques et al., 2012)
Resistência à tração	■ Teste Pull-off *	(Martínez et al., 2013, Botas et al., 2017)
	■ Velocidade de ultra-sons (UPV)	(Vasconcelos et al., 2008, Martínez-Molina et al., 2014)
Aderência	■ Teste Pull-off *	(Miccoli et al., 2014, Botas et al., 2017)
Módulo de Elasticidade (Estático)	■ Ensaio de macacos planos *	(da Porto et al., 2013, RILEM, 2004b, RILEM, 2004a)
Módulo de Elasticidade (Dinâmico)	■ Velocidade de Ultra-Sons (UPV)	(EN14146, 2006, Pinho, 2007)
	■ Frequência de ressonância fundamental	(EN14146, 2006, RILEM-TC25-PEM, 1980)
Capacidade de carga	■ Ensaio de carga	(McCann and Forde, 2001, Kashif Ur Rehman et al., 2016)
Nível de tensão instalado “in situ” e comportamento tensão-deformação	■ Ensaio de macacos planos *	(da Porto et al., 2013, RILEM, 2004a)
Deslocamentos e deformações	■ Régua de fendas	
	■ Extensómetros, Inclínómetros e LVDTs	(Binda et al., 2000, Glisic et al., 2007, Ohtsu, 2016)
	■ Estação Total	(Lignola and Manfredi, 2010, Husnul and Cahyono, 2016)
	■ Correlação Digital de Imagem (DIC)	(Almeida et al., 2016, Busse et al., 2008, Colla and Gabrielli, 2017)
Frequências naturais e	■ Testes Vibração	(Masciotta et al., 2016, Carvalho,

modos de vibração	Ambiental	2015)
	■ Testes de Impacto	(McCann and Forde, 2001, Miranda et al., 2012)
	■ IDS Georadar	(Mario et al., 2014, Stabile et al., 2012)

* Ensaio semi-destrutivo

Figura 5 - Testes utilizando o equipamento DRTMS (à esquerda) (Ludovico-Marques, 2008) e o de ultra-sons (à direita) (Pinho, 2007).



Figura 6 - Teste de vibração ambiental realizado no arco da Rua Augusta em Lisboa. Visão geral do arco e configuração do teste (adaptado de (Carvalho, 2015)).



3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ambiente agressivo a que os edifícios históricos estão sujeitos e a falta da manutenção contínua em muitos deles, põe uma grande parte esta herança cultural em risco devido a problemas estruturais que afetam a sua própria segurança e dos seus utilizadores (Lourenço et al., 2006). Por vezes, encontrar novos usos para edifícios antigos é uma forma sustentável de preservá-los, mesmo que a reabilitação da estrutura seja necessária (Biscaia et al., 2017). No entanto, a preservação e mitigação de risco do património cultural construído requer o uso de ferramentas confiáveis, a fim de avaliar o seu estado de conservação, identificando e prevenindo potenciais vulnerabilidades (Masciotta et al., 2016). Em muitas situações, entre as quais se encontram os edifícios históricos, não é possível realizar testes destrutivos. Portanto, é preferível executar testes não-destrutivos (Moropoulou et al., 2013b) ou metodologias alternativas que permitam a caracterização física e mecânica dos materiais e estruturas em estudo. Neste sentido, sintetizou-se neste artigo um conjunto de métodos e testes não destrutivos para o levantamento geométrico, o mapeamento de danos, a análise petrográfica e a caracterizar das propriedades físicas e mecânicas dos materiais de edifícios históricos de alvenaria de pedra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, R., NOEL, M. F., BRICEÑO, C., ARCE, D., CASTAÑEDA, B. & RAMOS, L. F. Geomatics' procedures and dynamic identification for the structural survey of the church of 'San Juan Bautista de Huaro' in Perú. *Brick and Block Masonry: Trends, Innovations and Challenges - Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, IBMAC 2016*, 2016. 815-820.
- ALMEIDA, G., MELÍCIO, F., BISCAIA, H., CHASTRE, C. & FONSECA, J. M. 2016. In-Plane Displacement and Strain Image Analysis. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31, 292-304.
- ANSELMETTI, F. S., LUTHI, S. & EBERLI, G. P. 1998. Quantitative characterization of carbonate pore systems by digital image analysis. *AAPG bulletin*, 82, 1815-1836.
- AVDELIDIS, N. P. & MOROPOULOU, A. 2004. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*, 5, 119-127.
- BINDA, L., SAISI, A. & TIRABOSCHI, C. 2000. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*, 14, 199-233.
- BIRGINIE, J. M. & RIVAS, T. 2005. Use of a laser camera scanner to highlight the surface degradation of stone samples subjected to artificial weathering. *Building and Environment*, 40, 755-764.
- BISCAIA, H., CHASTRE, C., CRUZ, D. & FRANCO, N. 2017. Flexural Strengthening of Old Timber Floors with Laminated Carbon Fiber Reinforced Polymers. *Journal of Composites for Construction*, 21, 04016073.

- BITOSSI, G., GIORGI, R., MAURO, M., SALVADORI, B. & DEI, L. 2005. Spectroscopic Techniques in Cultural Heritage Conservation: A Survey. *Applied Spectroscopy Reviews*, 40, 187-228.
- BLÄUER BÖHM, C. 2005. Quantitative Salt Analysis in Conservation of Buildings / Quantitative Salzanalyse bei der Konservierung von Bauwerken. *Restoration of Buildings and Monuments*, 11, 409.
- BORRELLI, E. & URLAND, A. 1999. *ARC Laboratory handbook: porosity, salts, binders, colour*, Rome, ICCROM, International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property.
- BOTAS, S., VEIGA, R. & VELOSA, A. 2017. Air lime mortars for conservation of historic tiles: Bond strength of new mortars to old tiles. *Construction and Building Materials*, 145, 426-434.
- BROWN, S. & SMITH, M. 2013. A transient-flow syringe air permeameter. *Geophysics*, 78, D307-D313.
- BUSSE, G., VAN HEMELRIJCK, D., SOLODOV, I. & ANASTASOPOULOS, A. 2008. *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing*, Taylor & Francis/Balkema.
- CAMPANA, S. 2017. Drones in Archaeology. State-of-the-art and Future Perspectives. *Archaeological Prospection*.
- CARMEN, V.-C., MONICA ALVAREZ DE, B., RAFAEL, F. & MARIA JOSE, V.-M. 2012. The measurement of surface roughness to determine the suitability of different methods for stone cleaning. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9, S108.
- CARVALHO, C. R. 2015. *Seismic vulnerability analysis of the Rua Augusta Arch* Universidade NOVA de Lisboa.
- CHASTRE, C. & LUDOVICO-MARQUES, M. 2017. Avaliação dos Portais de Pedra Arenítica da Igreja de São Leonardo Utilizando Testes Não Destrutivos. *Mecânica Experimental*, 28.
- CHASTRE, C. & LUDOVICO-MARQUES, M. 2018. Nondestructive testing methodology to assess the conservation of historic stone buildings and monuments. In: MAKHLOUF, A. S. H. & ALIOFKHAZRAEI, M. (eds.) *Handbook of Materials Failure Analysis: With Case Studies from the Construction Industries*. Butterworth-Heinemann.
- CHASTRE, C., LUDOVICO-MARQUES, M., SAUMELL, J., GUERRERO, M. & DELGADO, M. 2014. Surveying of Sandstone Monuments: New and Traditional Methodologies to Assess Viability of Conservation Actions. *40th IAHS World Congress of Housing. Sustainable Housing Construction*. Funchal, Portugal.
- CHEILAKOU, E., LIAROKAPI, N. & KOUI, M. 2012. NDT characterization of ancient glass objects from the Aegean with an approach of the manufacturing technique. *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V*.
- COLLA, C. & GABRIELLI, E. 2017. Photoelasticity and DIC as optical techniques for monitoring masonry specimens under mechanical loads. *Journal of Physics: Conference Series*, 778, 012003.
- COOMBES, M. A., FEAL-PÉREZ, A., NAYLOR, L. A. & WILHELM, K. 2013. A non-destructive tool for detecting changes in the hardness of engineering materials: Application of the Equotip durometer in the coastal zone. *Engineering Geology*, 167, 14-19.
- DA PORTO, F., MUNARI, M., PROTA, A. & MODENA, C. 2013. Analysis and repair of clustered buildings: Case study of a block in the historic city centre of L'Aquila (Central Italy). *Construction and Building Materials*, 38, 1221-1237.
- EN1936 2006. Natural stone test methods - Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. Brussels: CEN.
- EN12407 2006. Natural stone test methods - Petrographic examination. Brussels: CEN.
- EN14146 2006. Natural stone test methods - Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency). Brussels: CEN.

- FAELLA, G., FRUNZIO, G., GUADAGNUOLO, M., DONADIO, A. & FERRI, L. 2012. The Church of the Nativity in Bethlehem: Non-destructive tests for the structural knowledge. *Journal of Cultural Heritage*, 13, e27-e41.
- FAIRCHILD, M. D. 2013. *Color Appearance Models*, John Wiley & Sons, Ltd.
- FARIA, P. & CHASTRE, C. 2015. Visão Integrada da Reabilitação. In: LOURENÇO, P. B., PINHO, F., VASCONCELOS, G. & LÚCIO, V. (eds.) *Paredes 2015. Reabilitação e Inovação*. Lisboa.
- FERREIRA PINTO, A. P. & DELGADO RODRIGUES, J. 2012. Consolidation of carbonate stones: Influence of treatment procedures on the strengthening action of consolidants. *Journal of Cultural Heritage*, 13, 154-166.
- GLISIC, B., INAUDI, D., POSENATO, D., FIGINI, A. & CASANOVA, N. Monitoring of heritage structures and historical monuments using long-gage fiber optic interferometric sensors—an overview. Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure-SHMII-3, Vancouver, BC, Canada, 2007. 13-16.
- HEIDARI, M., CHASTRE, C., TORABI-KAVEH, M., LUDOVICO-MARQUES, M. & MOHSENI, H. 2017a. Application of fuzzy inference system for determining weathering degree of some monument stones in Iran. *Journal of Cultural Heritage*, 25, 41-55.
- HEIDARI, M., TORABI-KAVEH, M., CHASTRE, C., LUDOVICO-MARQUES, M., MOHSENI, H. & AKEFI, H. 2017b. Determination of weathering degree of the Persepolis stone under laboratory and natural conditions using fuzzy inference system. *Construction and Building Materials*, 145, 28-41.
- HINZEN, K.-G., SCHREIBER, S. & ROSELLEN, S. 2013. A high resolution laser scanning model of the Roman theater in Pinara, Turkey – comparison to previous measurements and search for the causes of damage. *Journal of Cultural Heritage*, 14, 424-430.
- HUSNUL, H. & CAHYONO, A. B. 2016. Combined aerial and terrestrial images for complete 3D documentation of Singosari Temple based on Structure from Motion algorithm. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 47, 012004.
- ICOMOS 2004. *International Charters for Conservation and Restoration = Chartes Internationales sur la Conservation et la Restauration = Cartas Internacionales sobre la Conservación y la Restauración*, München.
- ION, R. M., TEODORESCU, S., ȘTIRBESCU, R. M., DULAMĂ, I. D., ȘUICĂ-BUNGHEZ, I. R., BUCURICĂ, I. A., FIERĂSCU, R. C., FIERSCU, I. & ION, M. L. 2016. Effects of the restoration mortar on chalk stone buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133, 012038.
- JANSSENS, K. & VAN GRIEKEN, R. 2004. *Non-destructive Micro Analysis of Cultural Heritage Materials*, Elsevier Science.
- JONES, D. M. 2011. *3D Laser Scanning for Heritage*, English Heritage.
- KASHIF UR REHMAN, S., IBRAHIM, Z., MEMON, S. A. & JAMEEL, M. 2016. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, 107, 58-86.
- KATZ, A. J. & THOMPSON, A. H. 1986. Quantitative prediction of permeability in porous rock. *Physical Review B*, 34, 8179-8181.
- LIGNOLA, G. P. & MANFREDI, G. 2010. A combination of NDT methods for the restoration of monumental façades: The case study of Monte di Pietà (Naples, Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 11, 360-364.
- LOURENÇO, P., ROCA, P., MODENA, C. & OLIVEIRA, D. 2006. Reducing the seismic vulnerability of cultural heritage buildings. Universidade do Minho.
- LUDOVICO-MARQUES, M. 2008. *Contribuição para o conhecimento do efeito de cristalização de sais na alterabilidade de arenitos. Aplicação ao património edificado de Atouguia da Baleia*. Ph.D. Thesis, Universidade NOVA de Lisboa.

- LUDOVICO-MARQUES, M. & CHASTRE, C. 2012. Effect of salt crystallization ageing on the compressive behavior of sandstone blocks in historical buildings. *Engineering Failure Analysis*, 26, 247-257.
- LUDOVICO-MARQUES, M. & CHASTRE, C. 2014a. Conservation of sandstone monuments: a new approach in consolidation treatments. *40th IAHS Word Congress of Housing. Sustainable Housing Construction*. Funchal, Portugal.
- LUDOVICO-MARQUES, M. & CHASTRE, C. 2014b. Effect of consolidation treatments on mechanical behaviour of sandstone. *Construction and Building Materials*, 70, 473-482.
- LUDOVICO-MARQUES, M. & CHASTRE, C. 2016. Durability Assessment of Consolidation Effect on Sandstone Monuments. *41th IAHS World Congress of Housing. Sustainability and Innovation for the Future*. Albufeira, Portugal.
- LUDOVICO-MARQUES, M., CHASTRE, C. & VASCONCELOS, G. 2012. Modelling the compressive mechanical behaviour of granite and sandstone historical building stones. *Construction and Building Materials*, 28, 372-381.
- LUDOVICO-MARQUES, M., TAVARES, M., RODRIGUES, M., BLANES, F. & COSTA, C. 2005. Methodology used to carry out a fast identification of soluble salts in efflorescences of old mortars (in Portuguese). *Seminary of soluble salts in old mortars*. LNEC, Lisbon.
- MARIO, M., LUCA, P., GAETANO, R., SERGIO, V. C. & PAOLO, F. 2014. Comparison of natural and artificial forcing to study the dynamic behaviour of bell towers in low wind context by means of ground-based radar interferometry: the case of the Leaning Tower in Pisa. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11, 055004.
- MARTÍNEZ-MOLINA, W., TORRES-ACOSTA, A. A., JÁUREGUI, J. C., CHÁVEZ-GARCÍA, H. L., ALONSO-GUZMÁN, E. M., GRAFF, M. & ARTEAGA-ARCOS, J. C. 2014. Predicting concrete compressive strength and modulus of rupture using different NDT techniques. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- MARTÍNEZ, I., CASTILLO, A., MARTÍNEZ, E. & CASTELLOTE, M. 2013. Physico-chemical material characterization of historic unreinforced masonry buildings: The first step for a suitable intervention. *Construction and Building Materials*, 40, 352-360.
- MASCIOTTA, M.-G., ROQUE, J. C. A., RAMOS, L. F. & LOURENÇO, P. B. 2016. A multidisciplinary approach to assess the health state of heritage structures: The case study of the Church of Monastery of Jerónimos in Lisbon. *Construction and Building Materials*, 116, 169-187.
- MCCANN, D. M. & FORDE, M. C. 2001. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT & E International*, 34, 71-84.
- MENÉNDEZ, B. 2016. Non-Destructive Techniques Applied to monumental Stone Conservation. In: MÁRQUEZ, F., PAPAELIAS, M. & ZAMAN, N. (eds.) *Non-Destructive Testing*. InTech.
- MENEZES, A., GLÓRIA GOMES, M. & FLORES-COLEN, I. 2015. In-situ assessment of physical performance and degradation analysis of rendering walls. *Construction and Building Materials*, 75, 283-292.
- MICCOLI, L., MÜLLER, U. & FONTANA, P. 2014. Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, 61, 327-339.
- MILOŠ, D. & ZUZANA, S. 2013. Enhanced affordable methods for assessing material characteristics and consolidation effects on stone and mortar. *Journal of Geophysics and Engineering*, 10, 064005.
- MIRANDA, L. F., RIO, J., MIRANDA GUEDES, J. & COSTA, A. 2012. Sonic Impact Method – A new technique for characterization of stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 36, 27-35.
- MORILLAS, H., MAGUREGUI, M., GARCIA-FLORENTINO, C., CARRERO, J. A., SALCEDO, I. & MADARIAGA, J. M. 2016. The cauliflower-like black crusts on sandstones: A natural

- passive sampler to evaluate the surrounding environmental pollution. *Environ Res*, 147, 218-32.
- MOROPOULOU, A., BAKOLAS, A., KAROGLU, M., DELEGOU, E. T., LABROPOULOS, K. C. & KATSIOTIS, N. S. 2013a. Diagnostics and protection of Hagia Sophia mosaics. *Journal of Cultural Heritage*, 14, e133-e139.
- MOROPOULOU, A., LABROPOULOS, K. C., DELEGOU, E. T., KAROGLU, M. & BAKOLAS, A. 2013b. Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*, 48, 1222-1239.
- MUNSELL, A. H. 1915. *Atlas of the Munsell Color System*, Boston, Malden, Mass., Wadsworth, Howland & Co., inc., Printers.
- OHTSU, M. 2016. *Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures*, Springer.
- PAIPETIS, A. S., MATIKAS, T. E., AGGELIS, D. G. & VAN HEMELRIJCK, D. 2012. *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V*, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- PAOLETTI, D., AMBROSINI, D., SFARRA, S. & BISEGNA, F. 2013. Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation. *Journal of Cultural Heritage*, 14, 116-121.
- PÉREZ-GRACIA, V., CASELLES, J. O., CLAPÉS, J., MARTINEZ, G. & OSORIO, R. 2013. Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures. *NDT & E International*, 59, 40-47.
- PÉREZ-GRACIA, V., FONTUL, S., SANTOS-ASSUNÇÃO, S. & MARECOS, V. 2016. Geophysics: Fundamentals and Applications in Structures and Infrastructure. *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure*. CRC Press.
- PINHO, F. F. S. 2007. *Paredes de alvenaria ordinária: estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Universidade NOVA de Lisboa.
- RILEM-TC25-PEM 1980. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement / Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Materials and Structures*, 13, 175 - 253.
- RILEM 2004a. Test method recommendations of RILEM TC 177-MDT 'Masonry durability and on-site testing' - D.4: In-situ stress tests based on the flat jack. *Materials and Structures*, 37, 491 - 496.
- RILEM 2004b. Test method recommendations of RILEM TC 177-MDT 'Masonry durability and on-site testing' - D.5: In-situ stress - strain behaviour tests based on the flat jack. *Materials and Structures*, 37, 497 - 501.
- RIVEIRO, B. & SOLLA, M. 2016. *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure*, CRC Press/Balkema.
- SENESI, G. S., CARRARA, I., NICOLODELLI, G., MILORI, D. M. B. P. & DE PASCALE, O. 2016. Laser cleaning and laser-induced breakdown spectroscopy applied in removing and characterizing black crusts from limestones of Castello Svevo, Bari, Italy: A case study. *Microchemical Journal*, 124, 296-305.
- SHALABI, F. I., CORDING, E. J. & AL-HATTAMLEH, O. H. 2007. Estimation of rock engineering properties using hardness tests. *Engineering Geology*, 90, 138-147.
- SHEVELL, S. K. 2003. *The Science of Color*, Elsevier.
- SIEGESMUND, S. & DÜRRAST, H. 2011. Physical and Mechanical Properties of Rocks. In: SIEGESMUND, S. & SNETHLAGE, R. (eds.) *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- SIEGESMUND, S. & SNETHLAGE, R. 2011. *Stone in architecture: properties, durability*, Springer.

- SNETHLAGE, R. & STERFLINGER, K. 2011. Stone Conservation. In: SIEGESMUND, S. & SNETHLAGE, R. (eds.) *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- STABILE, T. A., GIOCOLI, A., PERRONE, A., PALOMBO, A., PASCUCCI, S. & PIGNATTI, S. 2012. A new joint application of non-invasive remote sensing techniques for structural health monitoring. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9, S53.
- SVAHN, H. 2006. *Non-Destructive Field Tests in Stone Conservation: Final Report for the Research and Development Project: Literature Study*, Riksantikvarieämbetet.
- TÖRÖK, Á. 2010. In Situ Methods of Testing Stone Monuments and the Application of Nondestructive Physical Properties Testing in Masonry Diagnosis. In: DAN, M. B., PŘIKRYL, R. & TÖRÖK, Á. (eds.) *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- VANDEVOORDE, D., CNUUDE, V., DEWANCKELE, J., BRABANT, L., DE BOUW, M., MEYNEN, V. & VERHAEVEN, E. 2013. Validation of in situ Applicable Measuring Techniques for Analysis of the Water Adsorption by Stone. *Procedia Chemistry*, 8, 317-327.
- VASANELLI, E., COLANGIULI, D., CALIA, A., SBARTAÏ, Z.-M. & BREYSSE, D. 2017. Combining non-invasive techniques for reliable prediction of soft stone strength in historic masonries. *Construction and Building Materials*, 146, 744-754.
- VASCONCELOS, G., LOURENÇO, P. B., ALVES, C. A. S. & PAMPLONA, J. 2008. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. *Ultrasonics*, 48, 453-466.
- VILES, H., GOUDIE, A., GRAB, S. & LALLEY, J. 2011. The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 320-333.
- WEVERS, M. 1997. Listening to the sound of materials: Acoustic emission for the analysis of material behaviour. *NDT & E International*, 30, 99-106.
- YASTIKLI, N. 2007. Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage*, 8, 423-427.