

LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS PATOLOGIAS DA CAPELA DO FUNDADOR DO MOSTEIRO DA BATALHA

SURVEY AND CHARACTERIZATION OF PATHOLOGIES OF THE FOUNDER'S CHAPEL OF THE MONASTERY OF BATALHA

VAZÃO; Flávio

Instituto Politécnico de Leiria, ESTG, Leiria, Portugal
flavio.vazao@gmail.com

GASPAR, Florindo

Instituto Politécnico de Leiria, ESTG, Leiria, Portugal
florindo.gaspar@ipleiria.pt

RODRIGUES, Hugo

Instituto Politécnico de Leiria, ESTG, Leiria, Portugal
f.rodrigues@ipleiria.pt

RESUMO

O Mosteiro de Santa Maria da Vitória, conhecido como Mosteiro da Batalha, é um dos mais belos exemplos de arquitetura em Portugal e na Europa, fazendo parte da lista do Património Mundial da UNESCO. A sua construção desenvolveu-se durante 150 anos, ao longo de diversas fases e composto por vários estilos: gótico, manuelino e renascentista. Foram feitas algumas alterações ao projeto inicial, resultando num grandioso e complexo Monástico que hoje inclui uma igreja, dois claustros com divisões anexas e dois panteões reais, a capela do fundador e as capelas imperfeitas. O património construído reúne patologias e defeitos derivados da deterioração dos materiais, cargas repetidas, falta de manutenção e eventos excepcionais. Dentro deste processo, as técnicas de inspeção e diagnóstico desempenham um papel importante, fornecendo informações e permitindo a definição de medidas de reparação adequadas. Para iniciar este levantamento e caracterização das patologias foi realizado um estudo piloto sobre a Capela do Fundador, onde foi realizada uma inspeção visual detalhada e um conjunto de ensaios não destrutivos, recorrendo a termografia, ultrassons, esclerómetro e varrimento laser scanning.

Palavras-chave: Património. Mosteiro da Batalha. Inspeção. Patologias. Ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

The Monastery of Santa Maria da Vitória, also known as the Monastery of Batalha, is one of the most beautiful examples of Portuguese and European architecture and has been part of the UNESCO World Heritage list. The construction took over 150 years, across various phases, and composed by several styles namely: gothic, Manuelino and some renaissance details. A number of changes were made to the initial project, resulting in a vast monastic complex that today includes a church, two cloisters with annexed dependencies and two royal

pantheons, the Founder's Chapel and the Unfinished Chapels. The built heritage, under the ambient conditions, even with a proper maintenance can have pathologies and defects due to deterioration of materials, repeated loading lack and exceptional events. Within this process, inspection and diagnosis techniques, play a major role, providing information and allowing the definition of adequate remedial measures. To start this procedure in the Monastery of Santa Maria da Vitória the Founder's Chapel was selected for a detailed survey and to be subjected to a non-destructive tests, using thermography and ultrasonic testing, preliminary diagnosis with pathology mapping and laser scanning.

Keywords: Heritage. Batalha Monastery. Survey. Pathologies. Non-destructive testing.

1. INTRODUÇÃO

O Mosteiro de Santa Maria da Vitória é um símbolo marcante de Portugal, não só por ser um marco na história, mas também pela grandiosa obra de engenharia e arquitetura.

A qualidade de um monumento varia em função das técnicas de construção, arquitetura, materiais utilizados e das intervenções e ações de conservação ao longo dos anos. Todos estes fatores são decisivos para a durabilidade e estado de conservação.

A pedra, material que está na essência da construção do Mosteiro da Batalha, está sujeita a alterações ao longo do tempo. Para a sua conservação e restauro é necessário o conhecimento de características e propriedades, assim como técnicas e produtos para a reabilitação.

Existe cada vez mais a consciência para a preservação e conservação dos edifícios antigos, principalmente monumentos, levando ao aparecimento de estudos de conservação e reabilitação do material pétreo.

O objetivo deste trabalho foi o estudo e inspeção da Capela do Fundador (CF), do Mosteiro da Batalha, através da avaliação do seu estado de conservação. Esta escolha da Capela do Fundador, deveu-se à sua construção parcialmente desintegrada da restante edificação (apenas um lado em comum com a Igreja), pois a sua construção não estava planeada no projeto inicial.

O desenvolvimento do estudo baseou-se na observação visual avaliação das patologias existentes, realizando o seu mapeamento, tentando enquadrar e interligar as possíveis causas/efeitos. Para apoiar este trabalho foi desenvolvida uma campanha de ensaios não-destrutivos, nomeadamente a medição da propagação dos ultrassons, termografia, temperatura e humidade, sendo estes equipamentos disponibilizados pelo Instituto Politécnico de Leiria. Foi realizada ainda em colaboração com a TOPCON o varrimento laser scanning do interior da Capela do Fundador.

2. O MOSTEIRO E A CAPELA DO FUNDADOR

2.1. ENQUADRAMENTO DO MOSTEIRO

O Mosteiro de Santa Maria da Vitória, mais conhecido por Mosteiro da Batalha, foi mandado construir em 1388 por D. João I, e surgiu de uma promessa à virgem Maria caso saísse vitorioso de uma batalha decisiva contra as tropas castelhanas, para subir ao trono de Portugal (por isso o nome atribuído de Mosteiro de Santa Maria da Vitória) e assim garantir a independência de Portugal. Esta foi a batalha de Aljubarrota de 14 de agosto de 1385, tendo-se iniciado a construção do Mosteiro 1 a 2 anos depois.

Este símbolo da História da Arte Portuguesa e Europeia que é o Mosteiro da Batalha ficou marcado no final do Séc. XIV como um dos maiores complexos religiosos do Gótico Português e assim influenciando as edificações em Portugal naquele tempo (Dias 1994). O Mosteiro é monumento nacional desde o séc. XIX e atualmente está na dependência do Direção-Geral do Património Cultural (DGPC) e faz parte da UNESCO desde dezembro de 1983 (Andrade 1989).

2.2. CAPELA DO FUNDADOR

Projetada pelo arquiteto Huguet e construída no segundo quartel do século XV, a Capela do Fundador não estava prevista aquando da construção inicial do Mosteiro. É capela concebida para panteão régio albergando vários túmulos das figuras mais importantes da história de Portugal. Entre elas estão D. João I e a sua esposa Dona Filipa de Lencastre na zona central, os seus filhos (Infante D. Henrique, D. Fernando, D. João e sua mulher D. Isabel, D. Pedro e a sua mulher D. Isabel de Urgel) na parede sul. Na parede oeste estão os túmulos dos reis D. Afonso V, D. João II e o seu filho, o infante D. Afonso (<http://www.mosteirobatalha.pt/pt/index.php>, acessado em setembro de 2015).

Localizada a sudoeste da Igreja a Capela o Fundador é constituída no interior pelos túmulos descritos anteriormente e 8 pilares sustentando a cobertura do octógono com 8 águas. Tem uma planta quadrada e após a primeira cobertura periférica de 4 águas levanta-se um octógono por cima de pilares descrevendo um “segundo andar” fechado por uma cúpula nervurada em forma de estrela (Branco F. A. 1990).

3. LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS PATOLOGIAS

3.1. MAPEAMENTO DAS PATOLOGIAS NA CAPELA DO FUNDADOR

A elaboração de uma representação gráfica da localização das zonas onde estão presentes manifestações de patologias, danos ou elementos degradados com indicação da sua intensidade permite ter uma melhor percepção do estado de conservação do caso de estudo, e permite também entender as suas possíveis causas. Este método complexo envolve os três alçados exteriores e a planta de cobertura da Capela do Fundador. Devido à extensão da área a mapear torna-se complicado um detalhe rigoroso, a agravar à impossível, por falta de meios, observação de perto das zonas mais elevadas.

O mapeamento foi dividido em vários tipos de degradação, nomeadamente: Desagregação granular, Crostas negras, Pátina, Manchas de humidade, Junta Aberta, Lacunas / Partido / Danificado, Vegetação / colonização biológica, Pedras recentes ou limpas, Musgo seco, Sujidade entranhada, Alveolização, Escamação / placas, Fissuração / fendilhação.

Englobou-se as pedras recentes ou recentemente limpas, que apesar de não ser uma patologia são notáveis as diferentes características, como a coloração e a maior suscetibilidade à degradação da pedra nova. Na desagregação granular, crostas negras e pátina optou-se por dividir em dois graus, o grau 1 de maior intensidade e o grau 2 de menor. Inseriu-se no mapeamento o musgo seco, patologia idêntica às crostas negras mas com uma camada mais espessa e seca.

O mapeamento foi elaborado em forma cromática. As cores atribuídas para a desagregação granular grau 1 foi um vermelho mais intenso e mais claro para grau 2, as crostas negras aparecem a cinzento-escuro no grau 1 e cinzento mais claro no grau 2. A cor escolhida para a pátina foi o laranja de maior intensidade para o grau 1 e um laranja mais claro para o grau 2. O azul-escuro foi escolhido para a humidade e um azul mais claro representando as juntas abertas.

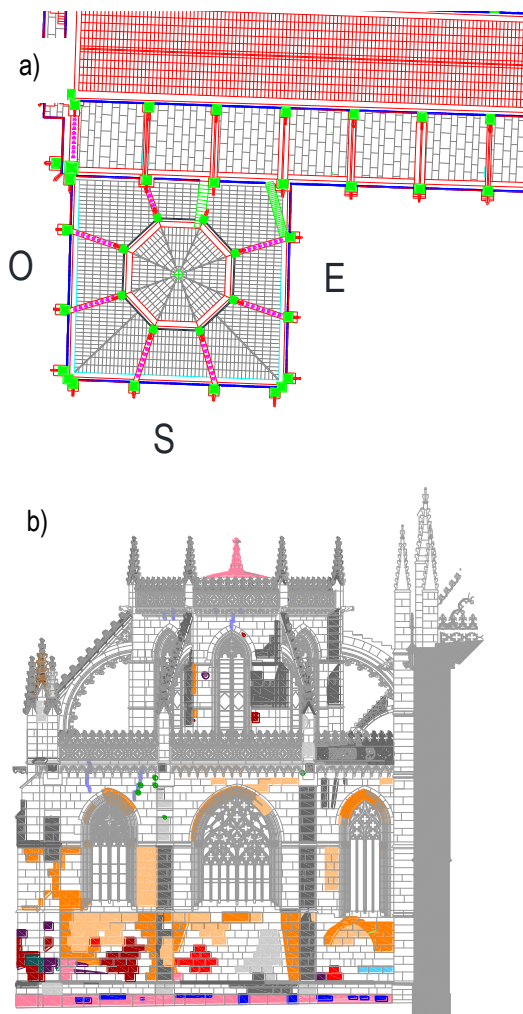
Com um castanho-escuro estão as lacunas, peças partidas ou danificadas, a verde está a vegetação e colonização biológica, as pedras novas ou limpas a rosa e a sujidade entranhada a bordeaux. O amarelo representa a alveolização, a escamação e placas a lilás e por último a fissuração e fendas com a cor violeta. Na Figura 1 estão mapeadas as patologias do alçado Este, Sul, Oeste e a planta de cobertura da Capela do Fundador.

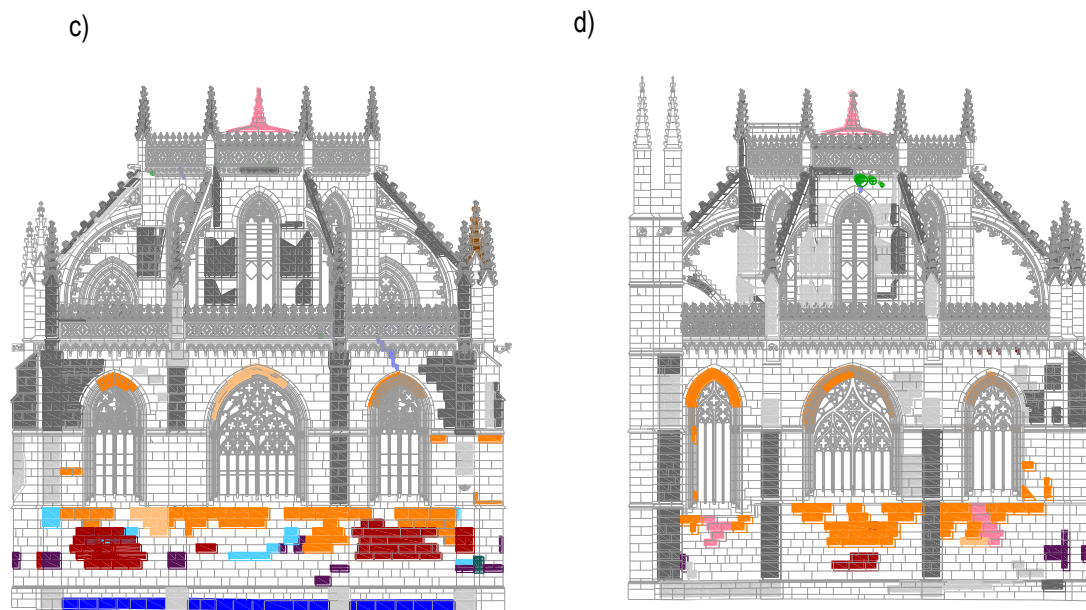
A patologia mais abrangente na pedra são as crostas negras. Esta camada negra que reveste o Mosteiro deve-se à proliferação da colonização biológica, como líquenes, fungos e

micro-organismos. As crostas negras estão presentes nos pináculos, na parte superior dos arcobotantes, flores-de-lis e contrafortes maioritariamente a jusante das gárgulas. A localização desta patologia deve-se sobretudo a zonas de escorrência de água, onde os micro-organismos transportados pela água ficam depositados na pedra.

De uma forma geral observa-se a pátina nos três alçados em zonas mais abrigadas. A consolidação das pedras com ceras e óleos em campanhas antigas podem ter originado esta patologia, que em ambientes menos expostos podiam-se ter conservado na pedra, ao contrário de ambientes mais expostos que se dissolveram com o tempo. Este fenómeno é mais visível nos interiores das ogivas das janelas e nas paredes junto e entre aos contrafortes.

Figura 1: a) Esquemática dos Alçados da Capela do Fundador, b) Mapeamento das patologias do Alçado Este, c) Mapeamento das patologias do Alçado Sul, d) Mapeamento das patologias do Alçado Oeste





Legenda:

1-Desagregação granular Grau 1	3-Pátina Grau 1	6-Inexistente Partido	10-Sujidade (cimento...)
1-Desagregação granular Grau 2	3-Pátina Grau 2	7-Vegetação	11-Alveolização
2-Crostas negras Grau 1	4-Humidade	8-Pedris moles/limpas	12-Escamação
2-Crostas negras Grau 2	5-Junto Aberto	9-musgo seco	13-Fissuração

Fonte: Autor, 2017

No alçado Sul é notável a humidade na primeira fiada da parede. Apesar ter sido substituída nos três alçados da Capela, apresenta sinais de absorção e infiltração de água. Não se sabe se este revestimento é original da época das obras de rebaixamento da cota exterior ou posterior a isso. Na primeira pedra do lado Este, assim como noutras é claramente visível que se trata apenas de uma placa com 3 a 4 cm. A forte humidade no arranque da parede Sul pode dever-se à passagem de um ribeiro entre a Capela e a estátua de D. Nuno Alvares Pereira. As manchas na pedra poderão dever-se também à absorção de sais, alterando cromaticamente a pedra. Uma vez enterrada durante alguns séculos a alvenaria recolheu em si a matéria salina da terra.

A absorção de água pela cobertura antes das últimas obras levaram à alteração cromática do teto da Capela para uma cor laranjada. Este fenómeno observa-se com mais incidência na zona central. A cor deve-se certamente ao arrastamento dos finos da degradação dos tijolos de burro que fazem de enchimento ao assentamento dos telhões e envolvem os tirantes.

A generalidade da desagregação granular e escamação acontece até cerca de três metros de altura, desconfiando-se que grande parte dos casos são pedras que não são de origem da construção inicial do Mosteiro, sendo possivelmente da campanha de restauros do

séc. XIX. Pontualmente existem outras pedras de revestimento aparentemente trocadas, supondo-se que foram colocadas apenas placas à semelhança do que acontece na primeira fiada.

Os arcobotantes além da função estrutural têm a função de escoar as águas da cobertura até ao descarregamento pelas gárgulas. Antigos entupimentos levaram a infiltrações de água na cobertura da Capela para o interior e aceleraram a degradação da pedra dos arcobotantes, provocando desagregação granular nas zonas de intradorso e colonização biológica, vegetação e crostas negras no extradorso. Estas patologias poderiam ter sido aceleradas nos arcobotantes devido à pedra dos restauros ser de pior qualidade.

As juntas abertas são visíveis principalmente na parte central por cima das janelas do octógono e também nalgumas janelas inferiores. Conforme será apresentado na análise do varrimento laser scanning, este facto poderá dever-se a deslocamentos na parte superior do octógono. Para um controlo da espessura destas aberturas, devia-se proceder a um sistema de monitorização. Existe contudo a cintagem metálica envolvente em redor da CF que ajuda ao confinamento da cobertura. Nela fazem parte espigões verticais, tirantes cruzados e tirantes descrevendo o perímetro. Muito provavelmente os tirantes atravessam de uma ponta à outra o octógono, passando dentro da cobertura. Os tirantes ligam-se aos espigões em forma de argola e desconhece-se se interligam os dois tirantes ao centro.

4. CAMPANHA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

Num Monumento histórico como o Mosteiro da Batalha, o diagnóstico deve ser apoiado preferencialmente com ensaios não-destrutivos. Os ensaios efetuados foram a avaliação da propagação da velocidade dos ultrassons na pedra, a análise da temperatura superficial através da termografia, medição da dureza superficial da pedra com o esclerómetro, e ainda nas pedras analisadas com os ultrassons mediu-se a temperatura e a humidade.

4.1 ULTRASSONS

4.1.1. Campanha de ensaios

No ensaio de ultrassons o acoplante, que serve para facilitar a transição dos ultrassons entre transdutores e o material em análise. No presente caso o acoplante foi selecionado com especial cuidado de modo a não danificar ou manchar a pedra do Mosteiro. Após testes em laboratório, a massa de moldar foi o material escolhido, dado que não deixava vestígios da sua

aplicação, removendo-se facilmente, ao contrário da vaselina que fica entranhada na porosidade da pedra. No decorrer dos ensaios houve o cuidado de renovar a massa utilizada como acoplante, sempre que esta começava a ficar seca após um conjunto de medições, de modo a obter estabilidade nos resultados.

Em cada pedra ensaiada recolheram-se cinco leituras ao longo de um determinado alinhamento, pelo método indireto, com leituras espaçadas de 15, 25, 35, 45 e 55 cm sucessivamente. Para uma maior precisão das medidas e rapidez dos ensaios usou-se uma bitola, ajudando também na fixação dos transdutores. O primeiro transdutor é fixo, deslocando-se o segundo nas diversas distâncias.

Os ensaios foram efetuados procurando testar pedras com diversas patologias como as crostas negras, pátina ou humidade, evitando as pedras com desagregação, pois torna-se complicado a recolha de dados nestas pedras, contudo é de esperar alguma dispersão nos resultados e na análise conjunta dos resultados, pois para além da massa não ser um acoplante perfeito ainda existem outras variáveis tais como a orientação da fachada, as diversas patologias e a localização. Ainda assim procurou-se ensaiar de forma homogénea as patologias para as diferentes orientações.

Com o intuito de retirar a relação entre os resultados obtidos com a vaselina e a massa de moldar realizaram-se ensaios em cinco pedras. Os ensaios foram realizados primeiramente com a massa de moldar e posteriormente com a vaselina, nos mesmos pontos. As pedras analisadas foram um bloco de mármore Espanhol negro Marquina com 58 cm de espessura, um bloco de calcário Ataíja com 38 cm de espessura e as restantes 3 pedras em calcário Moleanos em que duas tinham 5 cm e outra 3 cm de espessura, sendo o Moleanos a pedra com as características mais idênticas à pedra utilizada no Mosteiro da Batalha.

Os ensaios foram distribuídos uniformemente pela envolvente exterior da capela, sendo constituída pelos alçados oeste, sul e este, e pelo interior e na envolvente do octógono acima do primeiro nível da cobertura.

No alçado estes realizaram-se 10 pontos de medição, 14 pontos no sul e no alçado oeste 13. No interior foram efetuadas 46 registos distribuídas pelas paredes colunas e túmulos: 1 ensaio no canto da parede sul com a parede este, 10 na parede este, 19 na parede norte e 3 na oeste. Nos túmulos do lado oeste foram feitos 5 ensaios e os 8 restantes nas colunas centrais da Capela.

Na envolvente ao octógono desenvolveram-se 22 ensaios. Foram realizados ainda 17 ensaios na parede do lado sul da Igreja, servindo de comparação aos ensaios da Capela.

As pedras mais recentes ou limpas recentemente são também pedras de interesse à análise, que além de serem pedras retiradas de pedreiras diferentes das que se utilizaram na construção inicial do mosteiro, suspeita-se que são pedras apenas de revestimento superficial de 3 a 4 cm de espessura.

Devido à dificuldade de se ensaiarem as pedras em altura, os ensaios foram realizados até aos 3 metros de altura acima da cota do chão. Os ensaios foram uniformemente distribuídos no perímetro exterior da Capela do Fundador, tanto na zona do pavimento, como em redor do octógono.

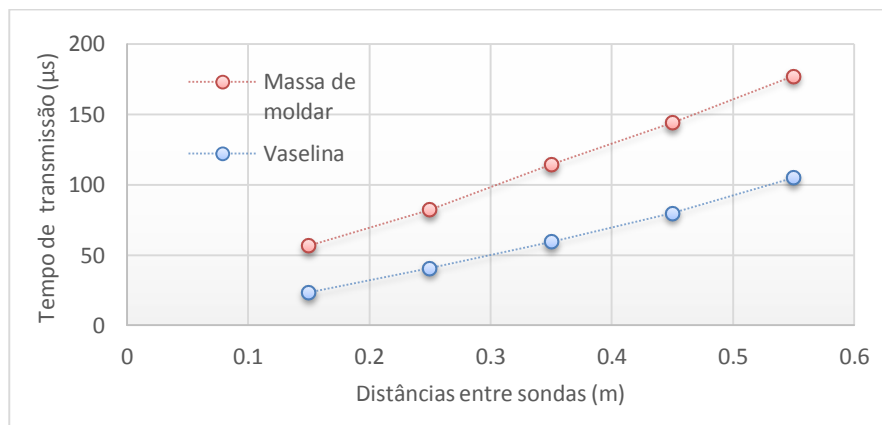
4.1.2. Influência da distância das sondas na velocidade

O valor médio global da velocidade obtido para a massa de moldar é de 2362 m/s. Analisando individualmente a velocidade para cada distância das sondas os valores são 2395, 2404, 2348, 2341 e 2337 m/s para 15, 25, 35, 45 e 55 cm de espaçamento entre sondas, respetivamente. Desta análise verifica-se que as diferenças não são significativas entre si, contudo com a exceção do primeiro valor, a velocidade vai decrescendo ligeiramente à medida que a distância aumenta. Esta perda de velocidade poderá dever-se ao aumento da dispersão das ondas ultrassónicas, originando quebra de transmissão ao atravessar a pedra.

4.1.3. Influência do acoplante

Na Figura 2 apresenta-se a análise da comparação entre a vaselina e a massa de moldar.

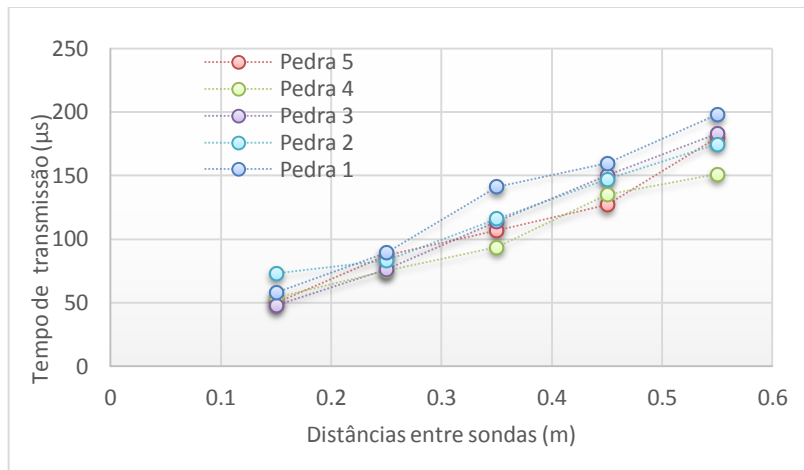
Figura 2 - Comparação entre diferentes acoplantes (vaselina e massa de moldar)



Fonte: Autor, 2017

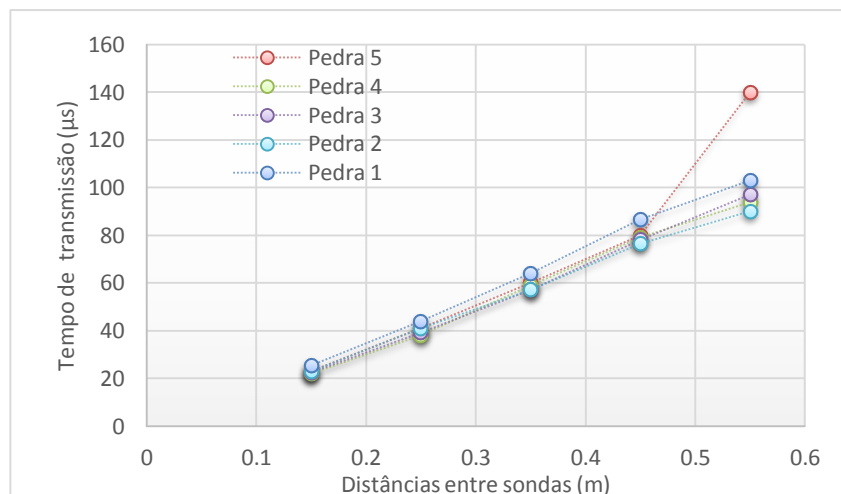
Os resultados obtidos permitem concluir que a utilização da massa de moldar origina valores do tempo da propagação dos ultrassons superiores à vaselina, conforme seria espectável, porque não proporciona transmissão tão efetiva. Entre as diferentes pedras analisadas a dispersão dos valores é menor para os resultados obtidos com a vaselina (Figuras 3 e 4).

Figura 3 - Leitura dos tempos de velocidade para a massa de moldar



Fonte: Autor, 2017

Figura 4 - Leitura dos tempos de velocidade para a vaselina



Fonte: Autor, 2017

Da análise dos resultados dos ultrassons verificou-se que não parecem existir diferenças devidas às diferentes espessuras de pedra.

Os valores do tempo de propagação afastam-se à medida que aumenta a distância entre as sondas, como resultado do aumento da dispersão dos ultrassons. Para cada distância (15,

25, 35, 45 e 55 cm) o quociente entre os valores médios dos tempos de transmissão obtidos com a vaselina e com massa de moldar são 0,410, 0,495, 0,519, 0,556, 0,591, respetivamente.

Para os valores de cada ensaio realizado nas pedras do Mosteiro foram multiplicados os coeficientes anteriores pelos tempos de transmissão para obter um valor espectável para o ensaio caso este fosse realizado com vaselina. A velocidade média global para a vaselina é 4657 m/s cerca do dobro da velocidade obtida para a massa de moldar (2362 m/s). Os valores da velocidade estimados para a vaselina variam entre 3578 e 5713 m/s em 90% dos casos.

Quando comparado com valores de outros trabalhos, 4657 m/s é inferior aos 6300 m/s de Kahraman et al. (2007) que apesar de ser pedra calcária e usar massa lubrificante como acoplante, trata-se de blocos recentemente extraídos da pedreira. A massa volúmica e a resistência à compressão do calcário analisado por Kahraman *et al.* (2007) é de 2660 Kg/m³ e 100,9 MPa respetivamente, valores superiores à pedra do Mosteiro da Batalha que tem valores de 2340 Kg/m³ e 37 MPa, respetivamente (Branco e Azevedo 1990).

Bromblet *et al.* (2012) apresenta valores médios semelhantes ao da Capela do Fundador, com 4715 m/s para uma zona norte da galeria e 4500 m/s para o sul da galeria na campanha de 2009 em que foram usados pedaços de câmara de ar das bicicletas como acoplante entre pedra e transdutores no Claustro da Igreja de Saint-Trophine em Arles, França.

4.1.4. Estimativa do módulo de elasticidade

Para comparação com outros trabalhos os valores obtidos foram os estimados para a vaselina sendo estes valores mais coerentes.

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido de acordo com a equação seguinte que relaciona o módulo de elasticidade dinâmico com o coeficiente de Poisson, a massa volúmica e a velocidade dos ultrassons.

$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \rho * V^2 \quad \text{Equação (1)}$$

E – Modulo de elasticidade dinâmico (kN/m²)

ρ - Massa volúmica (ton/m³)

ν - Coeficiente de Poisson

V- Velocidade dos ultrassons (m/s)

A massa volúmica considerada, teve por base o valor indicado no trabalho de inspeção e avaliação estrutural ao Mosteiro da Batalha (Branco e Azevedo 1990), cujo valor é 22,94

kN/m^3 . Segundo Guimarães (2009), o coeficiente de Poisson para a pedra estima-se ser entre 0,20 e 0,30, podendo considerar-se o valor médio de 0,25.

Assim, o valor estimado para o módulo de elasticidade dinâmico foi de 41,6 MPa. O valor convertido para o módulo de elasticidade estático de acordo com Najibi *et al.* (2014) foi de 20,9 MPa. Esta conversão foi obtida de acordo com a relação a seguir:

$$E_s = 0.14 \times E_d^{1.96} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

E_s - Modulo de elasticidade estático (kN/m^2)

E_d - Modulo de elasticidade dinâmico (kN/m^2)

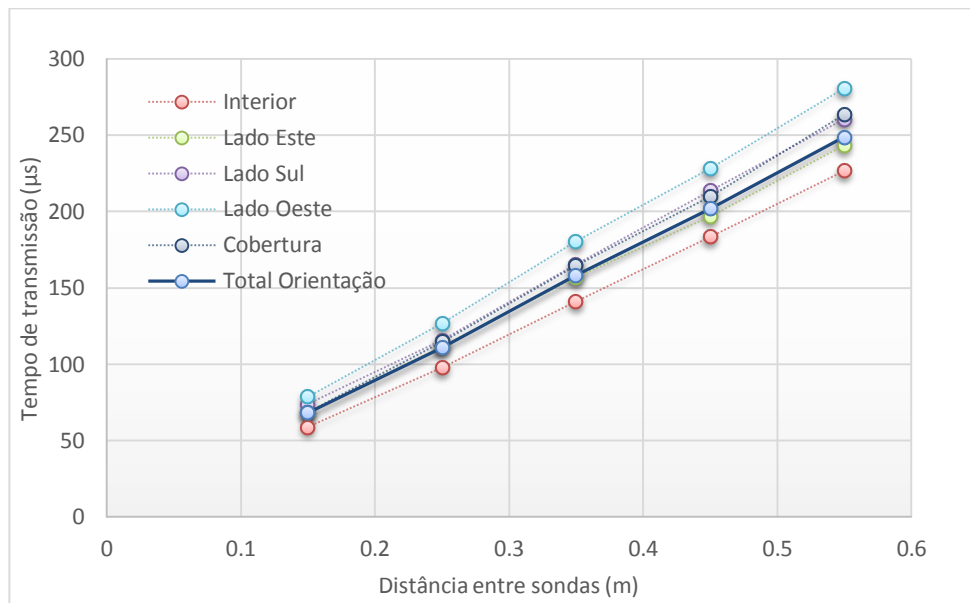
Na estimativa dos módulos de elasticidade podem associar-se diversos fatores de erro como a exatidão do coeficiente de Poisson e devido à conversão dos valores da massa de moldar para o equivalente à vaselina e erros de captação da velocidade ultrassônica com a massa de moldar, pois não permite uma transferência perfeita entre os transdutores e a pedra. Além destes fatores de imprecisão, há a possibilidade da pedra ter perdido ao longo do tempo propriedades, principalmente nas superfícies exteriores, levando à maior resistência da propagação dos ultrassons.

4.1.5. Influência da orientação e localização

Na análise da influência da orientação e localização das pedras, bem como da influência das patologias usaram-se os valores do tempo e da velocidade para a massa de moldar como acoplante.

Os valores médios do tempo de transmissão obtidos por orientação/localização ilustram-se no gráfico abaixo (Figura 5). Nele estão englobadas as médias dos tempos no interior da Capela, lado este, lado sul, lado oeste e cobertura (envolvente do octógono). Engloba-se a linha tracejada que é a média global.

Figura 5 - Gráfico comparativo entre orientações



Fonte: Autor, 2017

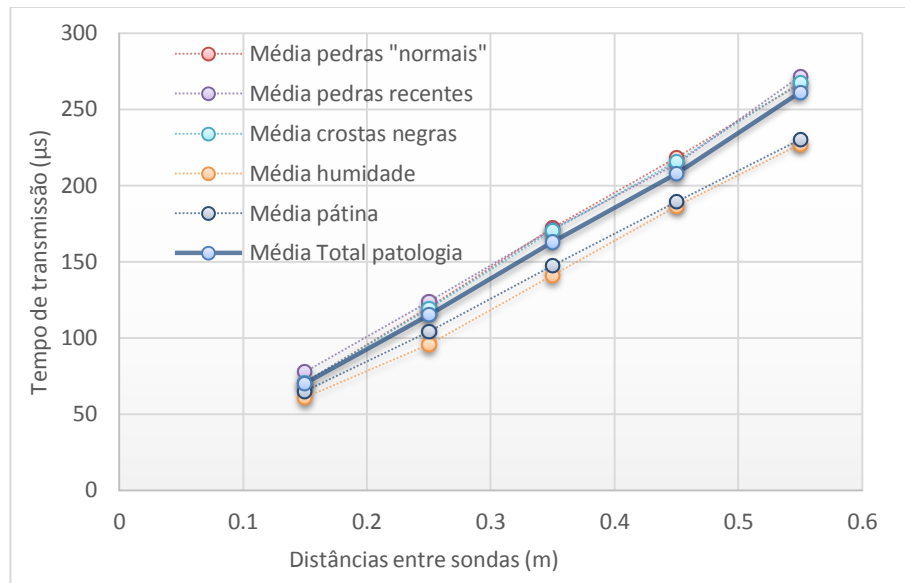
As elações retiradas do gráfico acima são as seguintes:

- A média da cobertura e alçado sul têm a mesma ordem de tempo de propagação de som;
- O tempo de propagação do som do alçado este, sul e cobertura é equivalente à média global;
- Quanto à orientação pode-se concluir que a pedra do alçado oeste é a que apresenta menor tempo de transmissão. Este facto pode dever a ser um alçado mais exposto aos agentes atmosféricos e também à maior poluição produzida pelos veículos no IC2 que poderá ter levado a maior degradação da pedra;
- Na generalidade com o aumento da distância das sondas, os tempos de propagação tendem a dispersar, ou seja, para a distância de 15 cm os tempos estão mais próximos do que para os 55 cm.

4.1.6. Influência das patologias

As patologias consideradas foram a pátina, humidade e crostas negras. Além destas ainda foram incorporadas as pedras originais sem patologias e as pedras recentes que apesar de não se tratarem de patologias, têm propriedades diferentes das outras pedras. À semelhança do gráfico anterior também se apresenta a média total. Da análise por patologia apresenta-se o gráfico abaixo.

Figura 6 - Gráfico comparativo entre patologias



Fonte: Autor, 2017

De acordo com o apresentado no gráfico obtêm-se as seguintes conclusões:

- As médias dos tempos das crostas negras, pedras sem patologias e pedras recentes têm valores muito próximos e na generalidade acima da média;
- Os menores tempos são relativos à pátina e humidade. A água na pedra, como já referido, é um fator que ajuda na propagação de sons, pois preenche os espaços vazios. A pátina contribui para a mais rápida propagação eventualmente por criar um filme aderente à pedra, diminuindo a porosidade exterior e protegendo o material pétreo;
- Todas as variáveis demonstram proporcionalidade na relação distancia/tempo.

4.2 TERMOGRAFIA

4.2.1 Campanha de ensaios

A termografia é uma tecnologia que conjuga as imagens visuais com imagens infravermelhas. O aparelho usado na termografia foi uma Fluke Ti45FT.

A leitura e edição das imagens no computador foi realizada pelo software SmartView 3.1. Na análise de resultados utilizou-se o valor de 0,95 para a emissividade de acordo com Mendonça (2005). Para a campanha de ensaios não se analisou a termografia usando a secagem dinâmica e arrefecimento, pois o objetivo não era o estudo aprofundado da influência das patologias na termografia mas sim a deteção das patologias. Contudo algumas

anomalias da pedra como pequenas fissuras só são possíveis de encontrar com efeitos de secagem como executado por outros autores como Silva (2012).

Os ensaios foram efetuados de forma homogênea na Capela do Fundador, procurando abranger todos os alçados, cobertura e interior e analisando a influência de outras variáveis como a idade da pedra, patologias e humidade, procurando-se identificar diferenças na temperatura devido às diversas variáveis.

A campanha de ensaios decorreu no período da manhã, altura em que a pedra se encontrava em fase de aquecimento.

4.2.2. Resultados e Discussão

Da análise das imagens recolhidas com a câmara termográfica obtiveram-se diversas conclusões.

É notável a baixa temperatura da pedra nas zonas sombrias pois pela manhã o sol aqueceu rapidamente as zonas expostas.

Com o estudo da temperatura da superfície da pedra do Mosteiro através da câmara termográfica podemos chegar a diversas conclusões mencionadas nos parágrafos abaixo, fazendo-se acompanhar de termogramas.

Um dos aspetos que se puderam observar foi a temperatura ser mais elevada nas pedras com a superfície mais escura, o que será devido à sua maior emissividade, ou seja, absorve mais radiação solar ao contrário das pedras mais claras que a refletem. Estas superfícies escuras na pedra devem-se às crostas negras ou à pátina demonstrando-se na escala cromática que se segue acompanhada da foto inerente.

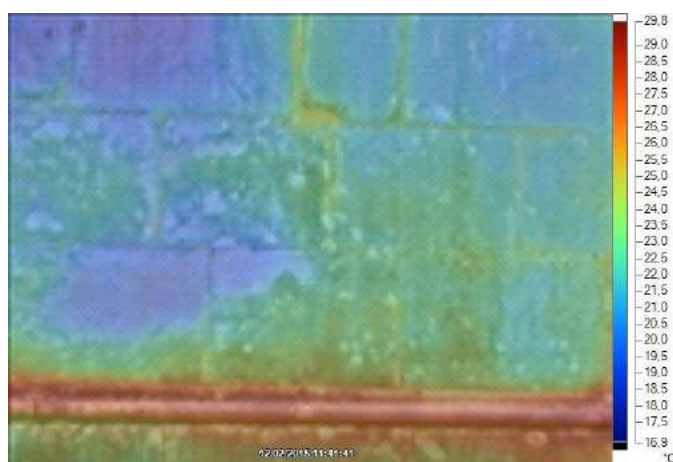
Figura 7 - Termografia das crostas negras e respetiva foto da localização



Fonte: Autor, 2017

Nas zonas em que a pedra está mais saliente (como o caso das molduras nas paredes) sofrem maior alteração de temperatura pois a inércia térmica é mais reduzida e para além disso estão mais expostas e com maior área de superfície para absorver a radiação. De manhã com o sol em contacto com a pedra estas superfícies aquecem mais rápido.

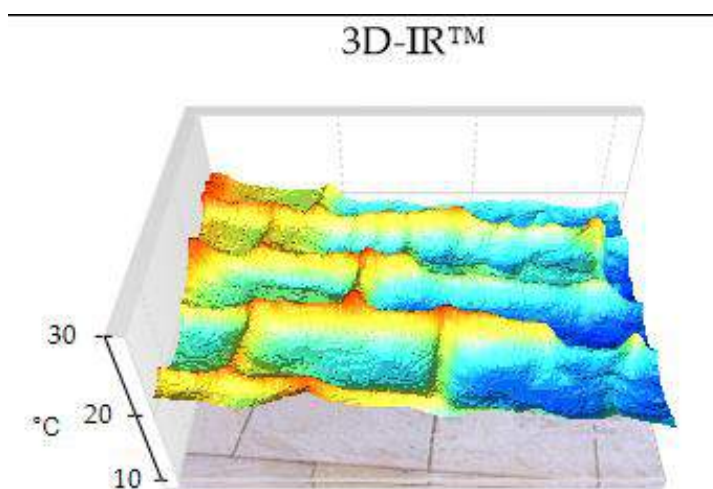
Figura 8 - Termograma do aquecimento das saliências



Fonte: Autor, 2017

Nas juntas entre as pedras a temperatura é superior à temperatura superficial das pedras. A argamassa da junta é um material de diferentes características em relação à pedra, e a junta mal preenchida (não preenchida em toda a profundidade) pode também ser a origem desta variação de temperaturas. Este facto é constatado pelo gráfico térmico em 3D representado a seguir onde se distingue as zonas avermelhadas, coincidindo com as juntas.

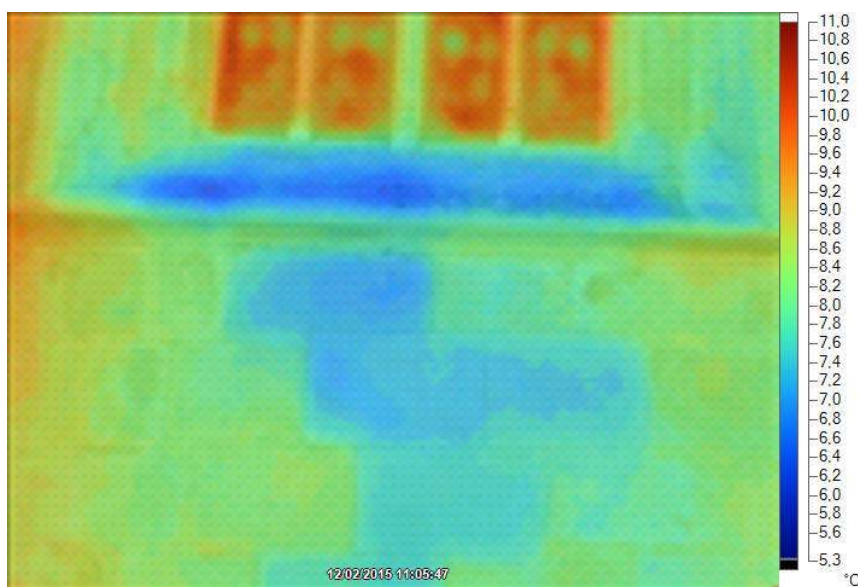
Figura 9 - Termograma de modelação em 3D representativo do aquecimento nas juntas de pedras (gráfico em 3D)



Fonte: Autor, 2017

Alguns locais foram observados diferenças na temperatura superficial de algumas pedras conforme se exemplifica na Figura 10. Julga-se que nestes casos as pedras poderão ter sido substituídas e se diferenciam das pedras vizinhas destacando-se no mapa de cores obtido com a câmara termográfica estando as pedras supostamente mais recentes mais frias. Estas pedras são muito provavelmente compostas por uma chapa de revestimento fina, que não acompanha a largura de toda a parede. A mancha azul do paramento representada no termograma a seguir é um exemplo das ditas pedras referidas anteriormente. A pedra de parapeito da janela apesar de estar mais fria julga-se ser original, a sua inclinação é que delimita a exposição à radiação solar.

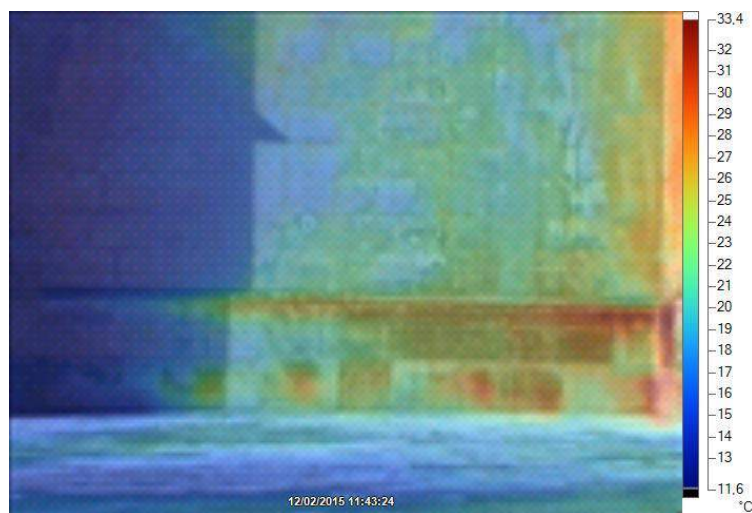
Figura 10 - Termografia das pedras recentes



Fonte: Autor, 2017

É notória uma elevada temperatura na parede junto ao chão que pode ser justificada pela presença de humidade que acelera o aquecimento e leva a uma maior conservação da temperatura. Na figura a seguir está representado este fenómeno.

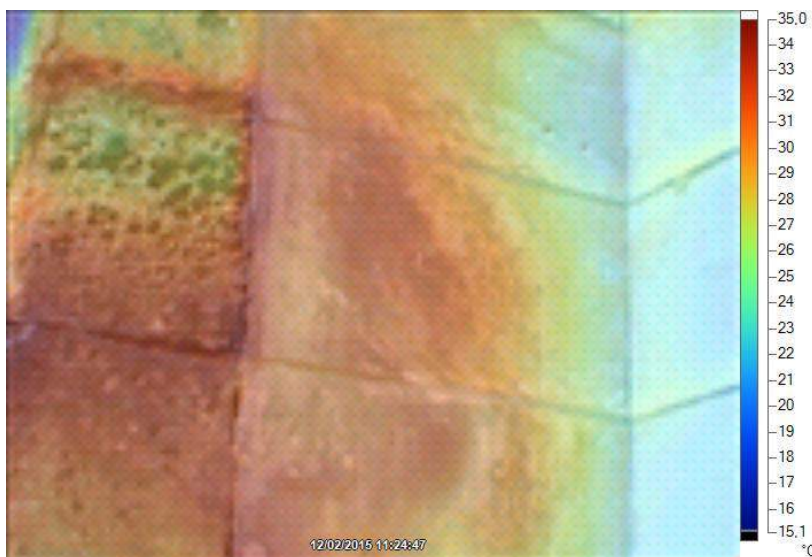
Figura 11 - Gráfico termográfico do aquecimento junto ao chão



Fonte: Autor, 2017

Nas pedras que padecem de escamação, desagregação e alveolização nota-se que a pedra está mais fria, o que pode dever-se à menor compacidade da massa pétreia e à superfície irregular que se opõe à penetração da radiação solar, como se observa na próxima figura.

Figura 12 - Alveolização representada no termograma



Fonte: Autor, 2017

4.3 HUMIDÍMETRO

Para cada pedra analisada com os ultrassons foi medida a humidade. A gama de valores da humidade variou entre 0,1 e 6,9%, sendo a média de 4,4%. Comparando a humidade interior com o exterior verificou-se serem em média iguais a 5,0 e 4,1

respetivamente. A maior humidade no interior será proveniente da absorção pela pedra e condensação, sendo a secagem e evaporação no interior mais lenta que no exterior. O sol e o vento no exterior proporcionam evaporação mais rápida de humidade, principalmente na porosidade aberta do calcário. É de referir que os valores foram retirados no período da manhã, ou seja, durante a fase de aquecimento e evaporação.

4.4. ESCLERÓMETRO

4.4.1. Campanha de ensaios

Para a campanha de ensaios realizados na Capela do Fundador foi usado um esclerómetro de Schmidt digital.

Foram analisadas várias pedras, escolhendo algumas das analisadas anteriormente nos ultrassons, homoganeamente espalhadas pela Capela. À semelhança dos ensaios de ultrassons não se retiraram medições das pedras com desagregação, placas e alveolização pois estas patologias iriam influenciar (baixar) em muito os valores de dureza de Schmidt (R). Para cada pedra recolheram-se 5 medições.

4.4.2. Resultados e Discussão

Os valores de cada conjunto de 5 medições situam-se no intervalo entre 30,7 e 59,2, não se distanciando muito dos valores da análise do granito da Sé de Lamego recolhidos por Machado (2012), que foram mais baixos.

O desvio padrão das medições de cada pedra varia entre 0,87 e 4,64. Apesar de só terem sido recolhidas 5 medições em cada pedra mostra não há grandes variações.

Verifica-se que a dureza superficial da pedra é maior no interior da Capela do Fundador. No exterior os valores esclerométricos são inferiores possivelmente devido ao desgaste dos agentes atmosféricos a par da poluição.

A parede do lado norte, comum com a Igreja, apresenta os valores de dureza de Schmidt mais altos, podendo eventualmente dever-se ao facto de ser uma parede interior, não estando sujeita a fatores atmosféricos como as paredes exteriores.

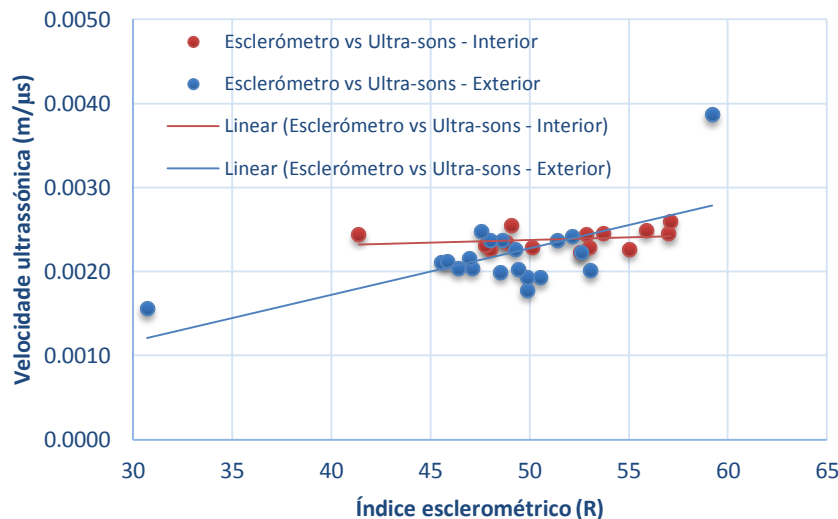
Verificou-se que os valores de R para as diferentes orientações da Capela são concordantes com velocidade de propagação dos ultrassons.

O maior valor de R foi no interior, decrescendo depois no alçado este, segue-se a cobertura, o alçado sul e por fim com um R mais baixo o alçado oeste. Esta sequência faz

sentido uma vez que coincide com o grau de exposição aos agentes degradadores como a poluição e agentes atmosféricos, isto é, o alçado este é o mais abrigado e o alçado oeste, localizado na fachada principal, mais desprotegido dos agentes atmosféricos. Para agravar este facto, o alçado oeste está voltado para a movimentada estrada IC2, onde a circulação de veículos fazem dela uma ativa fonte de poluição, podendo também estar na origem dos valores obtidos.

Procedeu-se à comparação gráfica dos resultados obtidos com esclerómetro com ultrassons. Relacionaram-se os valores do esclerómetro com os valores de ultrassons um a um e inseriu-se a linha de regressão linear como se pode ver no gráfico a seguir.

Figura 13 - Relação entre Esclerómetro e Ultra-sons com diferenciação do exterior do interior



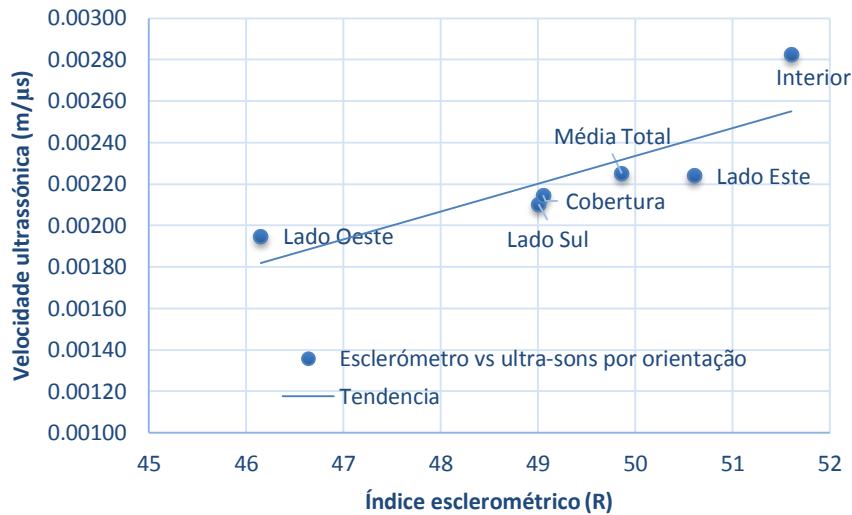
Fonte: Autor, 2017

A linha da tendência linear demonstra que existe uma relação entre a propagação da velocidade e os valores de Schmidt. Assim sendo pode-se afirmar que quanto maior forem os valores de R maior é a velocidade ultrassônica. Ambos são influenciados pela densidade e porosidade superficial da pedra.

A partir dos resultados dos gráficos conclui-se que a relação esclerómetro/ultrassons é mais baixa para o exterior e os seus valores são mais dispersos, ao contrário do interior. Chega-se ainda à conclusão que para o exterior é mais acentuada a evolução dos valores da velocidade com o aumento dos valores R. Já no interior os valores dos ultrassons mostram-se aproximadamente constantes com a evolução do índice esclerométrico.

Comparou-se também os valores da velocidade dos ultrassons com os valores obtidos com o esclerómetro, em função da variável orientação/localização (Figura 14).

Figura 14: Esclerómetro vs ultrassons por orientação



Fonte: Autor, 2017

A sequência de evolução dos valores é igual à referida anteriormente na análise dos valores obtidos nos ultrassons, não se alterando com a conjugação da velocidade. Isto demonstra que os dois ensaios estão em consonância também para a análise das orientações.

4.5 VARRIMENTO LASER SCANNING

4.5.1. Campanha de ensaios

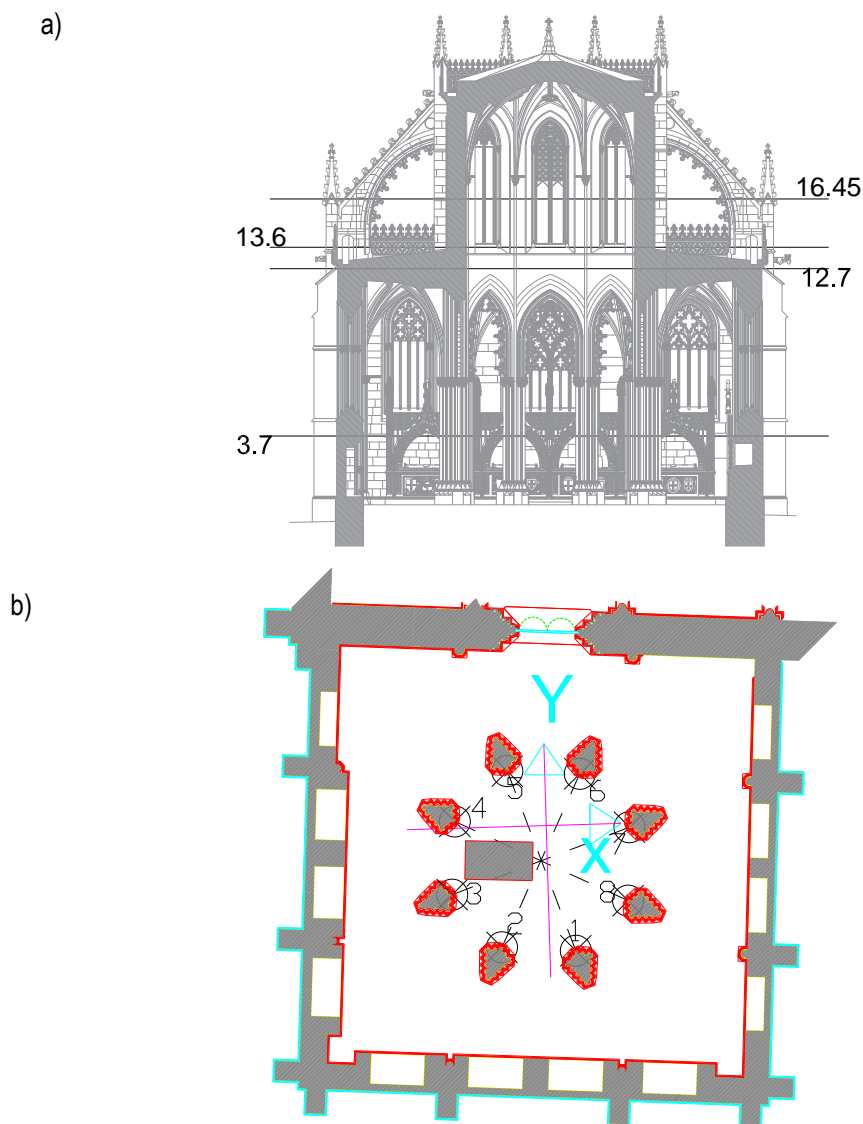
No âmbito do varrimento laser tentou-se identificar deslocamentos na Capela do Fundador. Para isso recorreu-se ao programa SCENE LT e retiram-se valores de pontos específicos.

O interior da Capela foi analisado segundo 8 alinhamentos verticais correspondentes ao intradorso dos 8 pilares que a constituem na zona central e que interligam a parte inferior da CF com a parte superior entre as janelas do octógono ao nível da cobertura. Em cada alinhamento vertical foram realizados 4 níveis de medição, 2 na parte superior da Capela às cotas de z (eixo vertical) de 16,45 m e de 13,6 m, que perfaz uma distância entre pontos de 2,85m, e os outros 2 na parte inferior às cotas de 3,7 e de 12,7, dando um desnível de 9 m.

Na obtenção dos resultados para cada alinhamento fez-se a resultante das distâncias medidas entre os eixos x e y.

Nas Figuras 17 e 18 apresentam-se o corte com indicação dos níveis medidos e a planta com indicação dos pontos, respetivamente. A planta além da referenciação dos pontos medidos também tem a linha tracejada os alinhamentos analisados mais à frente e referencial (x, y) do aparelho de varrimento laser.

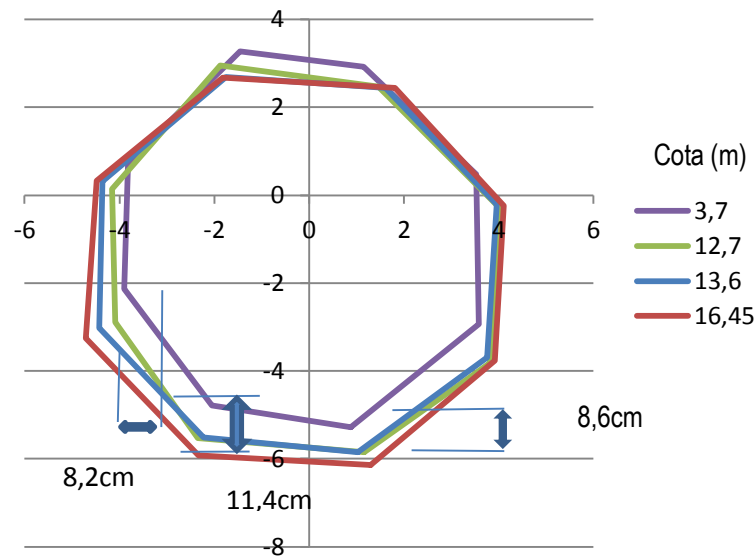
Figura 15 – a) Corte com indicação dos níveis medidos, b) Referencial e alinhamentos do varrimento laser



Fonte: Autor, 2017

Da representação gráfica dos pontos retirados do varrimento laser surge a figura seguinte:

Figura 16 - Implementação das medições do varrimento laser



Fonte: Autor, 2017

Neste gráfico são visíveis 4 níveis de leitura da CF. A cota 16,45 m está à escala natural, todas as outras têm um agravamento na escala de fator 10 em relação à diferença de coordenadas da cota mais elevada (16,45 m). É elucidativo que a CF apresenta um deslocamento para os lados sul, este e oeste, devendo-se eventualmente a efeitos consequenciais do deslocamento da Igreja, ou de acontecimentos mais pontuais decorrentes por exemplo da construção ou da atividade sísmica. Este fenómeno é mais notável à medida que a cota altimétrica sobe. Observa-se ainda que a parte do octógono do lado da igreja sofreu menores deslocamentos como resultado da maior rigidez da estrutura naquela zona.

Da análise dos resultados da verticalidade dos pilares na parte inferior da Capela e cantos do octógono na parte superior, as médias de inclinação vertical rondam os 8 mm por metro (Quadro 1). Nos pilares do tramo do octógono, entre as duas cotas de medição mais elevadas, o desvio na verticalidade é de 2,4 cm em que o mínimo é 6 mm e o máximo é 42 mm, isto para uma altura de 2,85 m. Na parte inferior os pilares têm uma média de desvio da verticalidade igual a 7,2 cm, onde 9,2 cm e 5,2 cm são os valores máximos e mínimos, respetivamente para o intervalo altimétrico de 9 metros (Quadro 1).

Quadro 1 - Desvios à verticalidade

	Altura entre cotas	Desvios à verticalidade (m)								Média	Inclinação (m/m)
		Pilar									
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Tramo superior (entre cota 16,45 e 13,6)	2,85	0,040	0,042	0,036	0,012	0,006	0,021	0,016	0,017	0,024	0,0084
Tramo Inferior (entre cota 12,7 e 3,7)	9,00	0,063	0,080	0,077	0,069	0,052	0,055	0,088	0,092	0,072	0,0080

Fonte: Autor, 2017

Além dos resultados anteriores da verificação à verticalidade, com o conjunto de coordenadas obtidas, conseguiu-se chegar a valores das distâncias cruzadas entre os pontos analisados dos pilares. Na Figura 15b está uma ilustração das medições das distâncias cruzadas retiradas entre os pilares.

Obtiveram-se 4 níveis de leitura de distâncias entre pilares (Figura 15a) e verificou-se que quanto mais para cima mais uniformes são as distâncias. A diferença máxima na medição da distância cruzada à cota 16,45m é de 2,2 cm e na medição à cota 3,7 m é de 11,7 cm, sendo a menor e maior diferença, respetivamente. Estas diferenças registam-se entre os alinhamentos 1-5 e o 3-7. No Quadro 2 refere-se esta informação de forma mais elucidativa. A média geral das distâncias é de 9,294 m, variando de 9,341 m (média das distâncias nos pontos mais elevados) e 9,24 m (medições em baixo). Esta é uma variação uniforme da qual se retira uma análise importante, visto se verificar que os pilares estarem a mais distantes à cota superior e com deslocamento na direção sul, perceptível com o desenvolvimento em altura. A variação é cerca de 10 cm mais ao nível da cobertura.

Todos os valores descritos anteriormente podem estar associados erros de precisão inerentes à leitura do varrimento laser e à exatidão de extração das coordenadas, visto ter de se centrar o ponto o mais possível no extradorso do redondo do pilar. Para além disso, não se sabe a precisão destas medidas aquando da sua construção.

Quadro 2 - Distâncias cruzadas (valores em m)

	Cota	Alinhamento				Dif. Máx.	Média
		1-5	2-6	3-7	4-8		
Parte superior	16,45	9,351	9,334	9,329	9,351	0,022	9,341
	13,6	9,314	9,284	9,281	9,322	0,042	9,300
Parte Inferior	12,7	9,345	9,286	9,247	9,306	0,099	9,296
	3,7	9,300	9,233	9,183	9,243	0,117	9,240

Fonte: Autor, 2017

5. CONCLUSÕES

A prática da conservação em Portugal, tem-se vindo a valorizar e aperfeiçoar. Há alguns anos atrás não existia tanto a preocupação da recolha de informação sobre a utilização adequada das técnicas e produtos a utilizar. Contudo ultimamente têm-se feito cada vez mais estudos de investigação não só no a nível internacional como nacional.

A consciencialização para a conservação por parte das pessoas ligadas a monumentos tem evoluído, principalmente nos funcionários responsáveis pela manutenção. Gestos simples como (a título de exemplo) a remoção de plantas infestantes, que causam problemas com as suas raízes a nível das juntas das pedras ou mesmo a rede porosa da pedra, fazem toda a diferença.

O emblemático Mosteiro de Santa Maria da Vitória tem vindo a sofrer graves patologias na sua pedra. A pedra mais afetada pela degradação é a da campanha de restauros do século XIX.

No exterior do edifício as crostas negras e a pátina abrangem a maioria da superfície da pedra exterior na Capela do Fundador. A desagregação granular e escamação são as patologias que se seguem e que por sua vez são mais gravosas que as primeiras. As crostas e pátina através da sua camada que envolve a superfície exterior da pedra, ajuda de certa forma à proteção contra os agentes degradadores.

No varrimento laser conclui-se que os pilares centrais apresentam distâncias entre eles que aumento com a cota de medição. A diferença entre a primeira medição acima do nível do chão (3,7m) e a última (16,45m) foi cerca de 10 cm e a abertura das juntas por cima das janelas do octógono é aparentemente causa dos deslocamentos e a razão para a implementação da estrutura metálica que envolve a cobertura do octógono da CF. Através de espigões e 2 tirantes metálicos e uma cintagem a consolidar a parte superior do octógono, minimizaram-se as suas deformações e movimentos. Ainda assim são bem visíveis as aberturas de juntas na parte superior do octógono. Existem pedras bastante desligadas e juntas que já foram fechadas. Na sequência das aberturas das juntas, a cobertura também é afetada tendo sido fechadas grandes espaçamentos, levando em alguns casos à colocação de gatos metálicos.

É possível que com a destruição do coruchéu da lanterna derivada ao terramoto de 1755 e a posterior execução da cobertura mais baixa tenha acelerado a abertura do octógono. O coruchéu da lanterna devido à sua altura e forma exercia essencialmente uma força de

componente vertical ao invés da baixa cobertura atual que provoca grandes esforços horizontais.

Dos ensaios realizados observa-se que os resultados dos ultrassons e esclerómetro estão em sintonia. O alçado oeste é o que revela piores resultados de características da pedra e o alçado este onde a pedra está com melhores propriedades, isto no exterior. O interior é o que melhores resultados apresenta e as degradações são mínimas com a exceção da desagregação de alguns túmulos.

Na termografia o mais relevante foram as pedras supostamente mais recentes que se distinguem claramente das outras por serem apenas placas de revestimento com 3 ou 4 cm de espessura, incluindo toda a primeira fiada do exterior da Capela.

O alçado oeste talvez por ser o menos abrigado e supostamente por estar mais exposto ao tráfego do IC2, é o que piores características na pedra apresenta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Diretor do Mosteiro da Batalha, Dr. Joaquim Ruivo, bem como a todos os técnicos daquele Mosteiro, em particular ao Dr. Pedro Redol, pela sua disponibilidade. Agradece-se também à Topcon Positioning Portugal que possibilitou o Varrimento Laser Scanning Capela do Fundador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, S. (1989) Mosteiro de Santa Maria da Vitória. Lisboa: Instituto Português do Património Cultural.

BRANCO, F. A., AZEVEDO, J. (1990) Mosteiro da Batalha - Inspecção e Avaliação Estrutural.” Estudo realizado para o Instituto Português do Património Cultural. Lisboa: Centro de Mecânica e Engenharia Estruturais da Universidade Técnica de Lisboa.

BROMBLET, P., VERGÈS-BELMIN, V., SIMON, S. (2012) Ultrasonic velocity measurements for the long-term monitoring of the degradation of marble columns in the Cloister of the Church of Saint-Trophime in Arles (France). 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone. New York: Columbia University.

COSTA, C. (2009) Obras de Conservação e Restauro de Edifícios Antigos: Estudos Sobre a Conservação da Pedra do Convento de S. Francisco de Mesão Frio. Dissertação de mestrado, Universidade de Trás-os Montes e Alto Douro - Escola de Ciências e Tecnologia.

DIAS, P. (1994) A Arquitetura Gótica Portuguesa. Editorial Estampa, Lisboa.

GUIMARÃES, M. I. M. (2009) Caracterização de paredes de Alvenaria de pedra por técnica sónica. Dissertação de mestrado, Faculdade Engenharia da Universidade do Porto.

KAHRAMAN, S., ULKER, U., DELIBALTA, M. S. (2007) A quality classification of buildings stones from P-wave velocity and its application to stone cutting with gang saws. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 427 - 430 Volume 107.

MACHADO, B. (2012) Caracterização das Litologias e Patologias da Sé de Lamego. Um estudo sobre alteração em monumentos graníticos. Tese de Doutoramento em Ciências da Terra e da Vida. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

MENDONÇA, P. (2005) Habitar sob uma Segunda Pele. Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados. Tese de doutoramento, Universidade do Minho.

MOCKOVCIÁKOVÁ, A., PANDULA, B. (2003) Study of the relation between the static and dynamic moduli of rocks. 37 - 39.

NAJIBI, A. R., GHAFORI, M., LASHKARIPOUR, G. R., ASEF, M. R. (2014) Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran. Journal of Petroleum Science and Engineering, 12.

SILVA, D. (2012) Diagnóstico de patologias em fachadas utilizando termografia. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.