U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS EFEITOS DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR TRÁFEGO NO PATRIMÓNIO INTEGRADO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

FABIANA DIAS LIMA MENDES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Xavier das Neves Romão

Coorientador: Engenheira Esmeralda Maria Dias de Castro Paupério Vila Pouca

JULHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais e irmão,

A única fonte de conhecimento é a experiência

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Concluído este trabalho, gostaria de deixar um sincero agradecimento a todas as pessoas e entidades que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Ao meu orientador, Professor Xavier Romão, por toda a disponibilidade, orientações e acompanhamento incansável ao longo de todo percurso. À minha coorientadora, Eng.ª Esmeralda Paupério, pelo apoio dado durante a elaboração da visita técnica ao edifício em estudo e todo o conhecimento que me transmitiu relativamente a esse assunto.

À Venerável Irmandade das Almas e Chagas de São Francisco (Capela das Almas) nas pessoas do Sr. Reitor Cónego Álvaro Mancilha e do Sr. Arquiteto Pedro Leão pela disponibilidade de acesso a todo o edifício e por todos os documentos disponibilizados para a elaboração do estudo.

Aos técnicos do Laboratório da Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) por toda a disponibilidade na elaboração dos ensaios necessários e deslocações à Capela das Almas.

Agradecer ao Eng.º Nuno Teixeira e Eng.º Jorge Quelhas da Metro do Porto, por todos os documentos fornecidos e disponibilidade de responder a qualquer dúvida.

Ao Eng.º Bruno Eugénio da Câmara do Porto por toda a informação a que me permitiu ter acesso.

Aos meus amigos pelos cinco anos de amizade, companheirismo e apoio.

Ao Francisco, pelo apoio incondicional, força e motivação que me deu ao longo destes meses de trabalho e por todo o caminho que fizemos juntos ao longo destes cinco anos.

Aos meus pais por todo incentivo e apoio dado ao longo de todo o meu trajeto na faculdade. O meu maior obrigada.

RESUMO

O controlo de vibrações induzidas pelo tráfego em património imóvel é uma questão muito importante na conservação e integridade dos edifícios históricos. Para quantificar a energia vibratória induzida pelos veículos pesados é utilizada o pico da velocidade das partículas (PPV). O PPV é a velocidade máxima com que as partículas se deslocam num determinado local, habitualmente medida em mm/s. Esta pode ser obtida diretamente através da utilização de geofones ou pela integração do vetor aceleração somado nas três direções ortogonais (De Brito et *al*., 2015), quando utilizados acelerómetros como instrumento de medição. O presente documento teve como princípio efetuar uma monitorização das vibrações, através de acelerómetros uniaxiais, num caso de estudo da cidade do Porto – a Capela das Almas. Para tal foram colocados oito acelerómetros, dois no exterior e seis no interior, com vista a avaliar as vibrações induzidas por tráfego rodoviário e ferroviário através da medição da PPV e verificar se são cumpridos os limites impostos por algumas normas (DIN 4150-3, 1999; BS 7385-2, 1993; NP 2074, 2015). Isto é, se os danos registados durante a inspeção à Capela das Almas, nomeadamente a queda constante de azulejos da fachada orientada para a rua Fernandes Tomás, são decorrentes da passagem numerosa de veículos pesados. Para além disso, e de forma avaliar o estado estrutural do edifício e de possíveis influências no comportamento da estrutura, foi efetuado um levantamento de todos danos registados em relatórios de inspeções precedentes, bem como um registo das patologias encontradas na inspeção do ano presente.

PALAVRAS-CHAVE: Vibrações, edifícios históricos, tráfego rodoviário e ferroviário, azulejos

ABSTRACT

The control of traffic-induced vibrations in buildings is a very important issue in the preservation and integrity of historic buildings. Peak particle velocity (PPV) is used to quantify the vibration energy induced by heavy vehicles. PPV is the maximum velocity at which particles travel in a given location, usually measured in mm/s. This can be obtained directly by using geophones or by integrating the acceleration vector, summed in the three orthogonal directions (De Brito et al., 2015), when using accelerometers as measuring instruments. This document had as principle to perform vibration monitoring through uniaxial accelerometers, in a case study in the city of Porto – the Capela das Almas. To this end, eight accelerometers were installed, two on the outside and six inside the building, in order to evaluate the vibrations induced by road and rail traffic, by measuring the PPV, and to check if the values are complied with the limits imposed by some standards (DIN 4150-3, 1999; BS 7385-2, 1993; NP 2074, 2015). That is, if the damages recorded during the inspection of the Capela das Almas, namely the constant fall of tiles facing Rua Fernandes Tomás, is due to heavy vehicle traffic. In addition, and in order to evaluate the structrural behavior of the building a survey was carried out, in order to collect all the data referring to registered damages in previous inspection, and the registry of pathologies found in the inspection of the present year was also considered.

KEYWORDS: Vibrations, historical buildings, road and rail traffic, tiles

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V
ÍNDICE GERAL VII
ÍNDICE DE FIGURAS XI
ÍNDICE DE TABELAS XV

1. INTRODUÇÃO 1
1.1 . ENQUADRAMENTO DO TEMA 1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 2

2. ANÁLISE DE NORMAS E ALGUNS CASOS DE ESTUDO 3
2.1. INTRODUÇÃO 3
2.2. NOÇÕES BÁSICAS SOBRE VIBRAÇÕES 3
2.3. VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VEÍCULOS 4
2.4. CRITÉRIOS NORMATIVOS DE AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES 5
2.4.1. RESPOSTA HUMANA 5
2.4.2. EFEITOS DAS VIBRAÇÕES EM EDIFÍCIOS 8
2.5. ALGUNS CASOS DE ESTUDO RELATIVOS A VIBRAÇÕES INDUZIDAS NOS EDIFÍCIOS HISTÓRICOS 15
2.5.1. INTRODUÇÃO 15
2.5.2. MONUMENTO AOS MÁRTIRES – CHENGDU, CHINA 15
2.5.3. PALÁCIO DE SÃO TEODORO – NÁPOLES, ITÁLIA 17
2.6. CONCLUSÕES 19

3. DESCRIÇÃO DA CAPELA DAS ALMAS E RESUMO DOS TRABALHOS REALIZADOS DE 1982 A 2012 21
3.1. INTRODUÇÃO 21
3.2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO E CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÓNICA DA CAPELA DAS ALMAS 22
3.3. MONITORIZAÇÕES E INTERVENÇÕES REALIZADAS NA CAPELA DAS ALMAS 25
3.3.1. TRABALHOS REALIZADOS ANTES DA CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRO DO BOLHÃO 25
3.2.2. TRABALHOS REALIZADOS AO LONGO DA CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DE METRO DO BOLHÃO 26
3.2.3. TRABALHOS REALIZADOS APÓS A CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DE METRO DO BOLHÃO 35
3.2.4. INSPEÇÃO DE ÂMBITO ESTRUTURAL 37

3.4. NOTAS FINAIS 42

4. AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DA CAPELA DAS ALMAS E DEFINIÇÃODO PLANO DE MONITORIZAÇÃO DAS VIBRAÇÕES 45

4.1. INTRODUÇÃO 45

4.2. INSPEÇÃO E ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DOS DANOS NA CAPELA DAS ALMAS 45

4.2.1. MAPA DE DANOS DA COBERTURA DA NAVE 46

4.2.2. MAPA DE DANOS DO INTERIOR DA CAPELA 54

4.2.2. MAPA DE DANOS DO EXTERIOR DA CAPELA 61

4.2.3. NOTAS FINAIS DA INSPEÇÃO 64

4.3. PLANO DE MONITORIZAÇÃO DAS VIBRAÇÕES DA CAPELA 65

4.3.1. APARELHOS DE MEDIÇÃO 66

4.3.2. ENSAIOS REALIZADOS NO LABORATÓRIO 67

4.3.2. LOCAL ESCOLHIDO PARA A COLOCAÇÃO DOS ACELERÓMETROS 69

4.3.3. REGISTOS DE MEDIÇÃO 70

4.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS AO PLANO DE MONITORIZAÇÃO 71

5. ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES 73

5.1. INTRODUÇÃO 73

5.2. PRINCÍPIOS DE ANÁLISE 73

5.2.1. PROCESSAMENTO DE SINAL COM MATLAB 75

5.3. AVALIAÇÃO DOS LIMITES DE VIBRAÇÃO 78

5.3.1. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO 78

5.3.2. ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA 86

5.3.2.1. COMPARAÇÃO DO REGISTO DO SINAL COM A PASSAGEM DE VEÍCULOS PESADOS 88

5.4. NOTAS FINAIS 90

6. CONCLUSÕES 91

6.1. RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS 92

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 95

ANEXOS

A.1 – LEVANTAMENTO DE DANOS NOS AZULEJOS DESDE SETEMBRO DE 2002 A DEZEMBRO DE 2004

A.2 – EVOLUÇÃO DAS PATOLOGIAS NOS AZULEJOS AO LONGO DA CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRO DO BOLHÃO

A.3 – INTERVENÇÕES NOS AZULEJOS APÓS A CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRO DO BOLHÃO

B – PATOLOGIAS NA ESTRUTURA DE MADEIRA DA COBERTURA DA NAVE

C.1 – INTERVENÇÕES DE RESTAURO NOS AZULEJOS APÓS A CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRO DO BOLHÃO

C.2 – MONTAGEM DA INSTRUMENTAÇÃO

D – REGISTOS DOS ACELERÓMETROS

E – PEÇAS DESENHADAS DO LEVANTAMENTO DE DANOS DA CAPELA DAS ALMAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de eixos utilizado segundo a norma ISO 2631-1 para avaliação das vibrações no corpo humano 7

Figura 2 - Curvas das velocidades limite (mm/s) para vibrações de curta duração medidos na base do edifício sugeridas pela norma DIN 4150-3 (1999) 10

Figura 3 - Valores limite para danos estéticos induzidos por vibrações transitórias, sugeridos pela norma BS 7385-2 (1990) 12

Figura 4 - Monumento do caso de estudo com respetivo esquema da posição dos acelerómetros de P_1 a P_4 16

Figura 5 - Esquema da localização da Capela das Almas 22

Figura 6 - Alçados do conjunto arquitetónico da Capela das Almas: (a) Fachada Principal (b) Alçado Lateral Sul 23

Figura 7 - Planta geral da Capela das Almas e respetivo corte transversal AA´ 24

Figura 8 - Planta da cripta 25

Figura 9 - Evolução das patologias entre o primeiro e o último levantamento 28

Figura 10 - Esquema da localização da Capela das Almas e secções de instrumentação 30

Figura 11 - Secção transversal da monitorização (Corte AA') 30

Figura 12 - Esquemas em 3D da estação de metro do Bolhão 31

Figura 13 - Esquema com localização da instrumentação na capela, adaptado dos desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco 32

Figura 14 - Esquema da localização das 36 unidades de azulejos da Capela-Mor submetidas a intervenção em 2007 36

Figura 15 - Configuração estrutural da asna 1 e da asna 5 38

Figura 16 - Planta com localização das sondagens realizadas com o Resistograph® segundo o IC-FEUP 38

Figura 17 - Registo obtido com o Resistograph® na linha da asna 2 da cobertura 39

Figura 18 - Escoras apoiadas na linha das asnas 4 e 5 (à esquerda) e escora que efetua ligação da asna 4 à parede lateral direita (à direita) 39

Figura 19 - Ligação da asna 4 com a madre 3 e a escora que apoia na parede lateral direita 39

Figura 20 - Corte transversal e planta de localização do dano 40

Figura 21 - Fissura na alvenaria de pedra 40

Figura 22 - Corte transversal e planta de localização do dano 40

Figura 23 - Humidade junto ao altar-mor 40

Figura 24 - Planta de localização do dano 41

Figura 25 - Fissuração generalizada no teto da nave 41

Figura 26 - Alçados de localização do dano 41

Figura 27 - Destacamento de azulejos com consolidação provisória com faceamento 41

Figura 28 - Planta de localização do dano 42

Figura 29 - Deformação da cobertura 42
Figura 30 - Degradação da madre 2 entre a asna 1 e 2 46
Figura 31 - Degradação da madre 2 entre a asna 2 e 3 46
Figura 32 - Degradação da madre 3 entre a asna 3 e 4 47
Figura 33 - Degradação do contra ripado entre a asna 2 e 3 na direção da fachada lateral direita 47
Figura 34 - Alvenaria de pedra da fachada direita 48
Figura 35 - Ligação do frechal com a linha da asna 1 (Fachada direita) 48
Figura 36 - Degradação da ligação do frechal com a asna 1 (Fachada norte) 49
Figura 37 - Degradação da ligação do contra ripado ao frechal na transição do arco-cruzeiro para o alçado direito 49
Figura 38 - Escoras apoiadas nas linhas das asnas 4 e 5 50
Figura 39 - Escora com ligação direta à fachada direita 50
Figura 40 - Indevido funcionamento da asna 5 50
Figura 41 - Fissura do arco-cruzeiro na zona da pedra de fecho 51
Figura 42 - Pregagens metálicas no arco-cruzeiro 51
Figura 43 - Fissura junto ao arco-cruzeiro junto à fachada sul 52
Figura 44 - Fissura junto ao arco-cruzeiro junto à fachada norte 52
Figura 45 - Fissura na zona da pedra de fecho do arco-cruzeiro 53
Figura 46 - Fissuração generalizada no teto com predominância na 1ª janela direita 54
Figura 47 - Fissuração generalizada com predominância no arco acima do vitral 54
Figura 48 - Fissuração no arco-cruzeiro 54
Figura 49 - Fissura na alvenaria de pedra 55
Figura 50 - Abertura de junta nas cantarias 55
Figura 51 - Humidade na 1ª janela esquerda 56
Figura 52 - Humidade junto ao arco-cruzeiro 56
Figura 53 - Fratura na padieira da porta de acesso ao coro-alto junto ao acesso da à torre sineira 57
Figura 54 - Fissura na alvenaria de pedra junto da janela da fachada da torre sineira 57
Figura 55 - Humidade junto à chaminé da inceneração 58
Figura 56 - Fissuração localizada na parede fundeira atrás do altar-mor 59
Figura 57 - Humidade e fissuras localizadas atrás do altar-mor 59
Figura 58 - Fissuração generalizada 60
Figura 59 - Fissuração generalizada 60
Figura 60 - Queda do azulejo junto à uma das janelas da fachada lateral direita da capela-mor 61
Figura 61 - Queda do azulejo junto à alvenaria de pedra na aresta da fachada lateral direita da capela-mor 61
Figura 62 - Empolamento de alguns azulejos. 61
Figura 63 - Degradação do suporte do sino 62

Figura 64 - Deformação da cobertura da nave 62

Figura 65 - Comparação do registo fotográfico da fissura localizada na cobertura da Capela das Almas no ano 2012 (esquerda) e no ano 2018 (direita) 63

Figura 66 - Candeeiro da capela pendurado na cumeeira da cobertura através de um perfil metálico UNP80 64

Figura 67 - Local a partir da qual foi possível a medição da espessura da laje da abóbada da cobertura e espessura da argamassa 64

Figura 68 - Esquema da constituição da abóbada 64

Figura 69 - Rua Fernandes Tomás antes da finalização das obras do pavimento 65

Figura 70 - Ensaios no laboratório tendo em vista a escolha de um acelerómetro: (a) suporte dos acelerómetros; (b) acelerómetros com respetiva cablagem de ligação ao computador 67

Figura 71 - Dano no azulejo de ensaio após remoção do acelerómetro colocado com massa adesiva Pattex® 67

Figura 72 - Dano no azulejo de ensaio após remoção do acelerómetro colocado com supercola identificado com o círculo 67

Figura 73 - Acelerómetro removido por torção, onde é visível um ligeiro vidrado do azulejo 68

Figura 74 - Removedor de cola e diluente utilizados durante a remoção dos acelerómetros 68

Figura 75 - Comparação do acelerómetro PCB 353B03 e PCB 393A03, relativamente à captação de ruído 68

Figura 76 - Azulejo com placa metálica para colocação do acelerómetro PCB 393A03 ± 5g 69

Figura 77 - Dano no azulejo de ensaio após remoção da placa metálica aplicada com massa adesiva Pattex® 69

Figura 78 - Alçado da fachada principal e da fachada lateral direita e respetivo corte e planta, com a localização dos acelerómetros (Desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco - Capela das Almas) 70

Figura 79 - Exemplo de passagem de um gráfico contínuo (digital) para um gráfico discreto (analógico) 73

Figura 80 - Comparação do sinal antes e após utilização do comando *detrend* 76

Figura 81 - Filtro ideal passa-baixo e passa-alto 77

Figura 82 - Comparação do filtro passa-baixo de 2ª ordem e 10ª ordem 77

Figura 83 - Alçado da fachada principal e da fachada lateral direita com a localização dos acelerómetros 78

Figura 84 - Comparação de um registo efetuado como o acelerómetro PCB 393A03 e PCB 393B12 80

Figura 85 - Registo efetuado em todos os canais de aquisição durante uma hora (00h-01h) 81

Figura 86 - Comparação do registo efetuado no acelerómetro Acc_0 e Acc_7 82

Figura 87 - Registo efetuado em todos os canais de aquisição durante uma hora (14h-15h) 83

Figura 88 - Pormenor da posição dos acelerómetros Acc_2 e Acc_3 84

Figura 89 - Registos de sinais que se julgam serem originados por possíveis pancadas acidentais no equipamento 85

Figura 90 - Comparação do sinal no domínio do tempo e respetivo espectro de Fourier do acelerómetro Acc_3 e Acc_4 87

Figura 91 - Espectro de Fourier do acelerómetro Acc_4 para uma velocidade de pico de 3,47 mm/s ... 88
Figura 92 - Espectro de Fourier do acelerómetro Acc_4 para uma velocidade de pico de 3,50 mm/s ... 88
Figura 93 - Registo do sinal e respetiva passagem de veículos pesados 89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores aceitáveis de KB para edifícios residenciais de acordo com a norma DIN 4150-2.. 6

Tabela 2 - Direção, posição e critério referente a cada curva de ponderação 6

Tabela 3 - Gama de valores de VDV ($m/s^{-1.75}$) associados a diferentes probabilidades de queixas em edifícios residenciais (BS 6472-1, 2008)..... 8

Tabela 4 - Classes das Estruturas de acordo com SN 640 312 (Studer e Suesstrunk,1981)..... 8

Tabela 5 - Valores limite (mm/s) sugeridos pela norma SN 640 312 (Moutinho, 2007) 9

Tabela 6 - Velocidades limite (mm/s) para vibrações de curta duração sugeridas pela norma DIN 4150-3 (1999)..... 9

Tabela 7 - Intervalos de resposta das estruturas a vários tipos de fontes de vibração indicados pela norma BS7385-1 (1993)..... 11

Tabela 8 - Valores limite para danos estéticos induzidos por vibrações transitórias sugeridos pela norma BS 7385-2 (1990)..... 11

Tabela 9 - Valores de velocidade de vibração das partículas de acordo com a Autoridade Federal do Trânsito (Bonterra PSOMAS, 2014)..... 12

Tabela 10 - Valores de velocidade de vibração das partículas segundo o Departamento de Transportes da Califórnia (Bonterra PSOMAS, 2014) 13

Tabela 11 - Valores de velocidade de vibração das partículas sugeridos pela AFTES 13

Tabela 12 - Valores de velocidade de vibração das partículas sugeridos pelo Ministério do Ambiente 14

Tabela 13 - Valores limite para a velocidade de vibração (mm/s) recomendados pela norma NP 2074 (2015) 14

Tabela 14 - Resultados médios finais das velocidade registados nos pontos de 1 a 4 17

Tabela 15 - Valores dos coeficientes x e t para a aplicação na fórmula desenvolvida por Watt..... 18

Tabela 16 - Síntese dos documentos utilizados neste capítulo..... 21

Tabela 17 - Síntese dos levantamentos realizados na Capela das Almas entre setembro de 2002 e abril de 2005 (Hipólito e Torres, 2005a)..... 27

Tabela 18 - Critérios de atenção e alarme para a Capela das Almas (Santos *et al*., 2006)..... 29

Tabela 19 - Relação dos componentes utilizados na argamassa de nivelamento e de assentamento (Hipólito e Torres, 2005b)..... 34

Tabela 20 - Etapas dos procedimentos de conservação e restauro realizados na Capela das Almas - adaptado do relatório de intervenção da Capela das Almas (Hipólito e Torres, 2005b) 34

Tabela 21 - Mapa de danos na cobertura – degradação das madres..... 46

Tabela 22 - Mapa de danos na cobertura da nave - degradação do contra ripado..... 47

Tabela 23 - Mapa de danos na cobertura da nave – fraco embricamento na alvenaria 48

Tabela 24 - Mapa de danos na cobertura da nave – Humidade na linha da asna 1..... 48

Tabela 25 - Mapa de danos na cobertura da nave – Degradação do frechal 49

Tabela 26 - Mapa de danos na cobertura da nave – Introdução de esforços adicionais 50

Tabela 27 - Mapa de danos na cobertura da nave – fissuração..... 51

Tabela 28 - Mapa de danos na cobertura da capela-mor– fissuração 53
Tabela 29 - Mapa de danos do interior da capela– fissuração generalizada no teto 54
Tabela 30 - Mapa de danos do interior da capela– fissuração na parede de alvenaria 55
Tabela 31 - Mapa de danos do interior da capela– abertura de juntas 55
Tabela 32 - Mapa de danos do interior da capela – problemas de humidade 56
Tabela 33 - Mapa de danos do interior da torre sineira– fissuração 57
Tabela 34 - Mapa de danos do interior da torre sineira – problemas de humidade 58
Tabela 35 - Mapa de danos do interior da capela-mor – fissuração e humidade 59
Tabela 36 - Mapa de danos do interior da capela-mor – fissuração generalizada 60
Tabela 37 - Mapa de danos no exterior da capela – destacamento/empolamento de azulejos 61
Tabela 38 - Mapa de danos no exterior da capela – degradação do suporte do sino 62
Tabela 39 - Mapa de danos no exterior da capela – deformação da cobertura da nave 62
Tabela 40 - Características do acelerómetro PCB 393A03 66
Tabela 41 - Características do acelerómetro PCB 353B03 66
Tabela 42 - Características do acelerómetro PCB 393B12 71
Tabela 43 - Velocidades limite (mm/s) para vibrações de curta duração sugeridas pela norma DIN 4150-3 (1999) 74
Tabela 44 - Valores limite para danos estéticos induzidos por vibrações transitórias sugeridos pela norma BS 7385-2 (1993) 75
Tabela 45 - Valores limite para a velocidade de vibração (mm/s) recomendados pela norma NP 2074 (2015) 75
Tabela 46 - Velocidade máximas (mm/s) obtidas em todos os canais do dia 5 a 11 de maio 79
Tabela 47 - Velocidades máximas (mm/s) atingidas em todos canais com anomalias 85
Tabela 48 - Velocidades máximas (mm/s) atingidas em todos os canais 86

1
INTRODUÇÃO

1.1 .ENQUADRAMENTO DO TEMA

Com o desenvolvimento e expansão das infraestruturas de transportes nas cidades, as construções ficaram sujeitas aos diversos agentes causadores de patologias. No caso dos imóveis património histórico, o processo de degradação por estes fatores terá de ser avaliado para evitar o agravamento de danos constantes. O aumento do tráfego rodoviário e a implementação de vias ferroviárias nas grandes cidades, despoletaram um aumento de ondas vibratórias no solo que têm levado a uma série de preocupações nas últimas décadas devido aos danos e distúrbios causados nos edifícios e seus residentes. Este fenómeno de geração de vibrações depende de inúmeros parâmetros. De acordo com Del Grosso e Basso (2014), a geração de ondas é influenciada pelas condições superficiais das estradas, pelas características do veículo, pelas condições do solo, pelas características dinâmicas e estado de conservação do próprio edifício. Nos centros históricos as preocupações acentuam-se, uma vez que existe um aumento de transportes públicos de grande capacidade, a fim de reduzir a utilização do transporte individual. Além disso, em algumas cidades os pavimentos são constituídos por calçadas não uniformes que originam vibrações aquando do impacto da roda do veículo com as irregularidades. Assim, a monitorização das vibrações induzidas por tráfego de veículos pesados é uma questão muito importante na conservação do património pois permite reduzir danos a longo prazo.

Perante aquilo que foi mencionado anteriormente, a presente dissertação tem como objetivo entender melhor a problemática das vibrações de um edifício histórico situado no coração do Porto – a Capela das Almas. Construída no século XVII, a capela é um edifício religioso de linhas simples em que a sua maior atração são os painéis azulejares, da autoria do pintor Eduardo Leite, que revestem toda a fachada exterior principal e lateral direita. Em 1993 foi classificada como imóvel de interesse público (Barros *et al*., 2002). Deste modo, no estudo realizado neste documento irá ser analisada a influência dos movimentos vibratórios induzidos por tráfego rodoviário e pelo metro subterrâneo do Porto e a possibilidade de uma eventual ligação com o surgimento constante de azulejos destacados/empolados.

Assim, o trabalho tem como base uma inspeção à capela para avaliar o estado de conservação da estrutura e do próprio edifício, com levantamento dos danos existentes, e posteriormente efetuar comparações com a descrição dos danos anteriores. A monitorização da capela é feita através da utilização de 8 acelerómetros, a fim de recolher as velocidades de vibração máximas induzidas pelo tráfego. O tratamento dos dados adquiridos é efetuado com recurso ao software MATLAB.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O conteúdo da presente dissertação encontra-se dividido em seis capítulos, sendo exposta de seguida uma breve descrição de cada um desses capítulos. O presente capítulo assume apenas o papel de enquadramento geral do tema.

No capítulo 2 apresenta-se um resumo de algumas normas que sugerem limites máximos para a velocidade de vibração das partículas nos edifícios, dando maior enfâse a limites relacionados com vibrações induzidas por tráfego em edifícios históricos. Ainda neste capítulo, são abordados alguns artigos de casos de estudos ocorridos em edifícios históricos, em que são avaliadas as vibrações induzidas por tráfego.

O capítulo 3 inicia-se com um breve descrição e enquadramento histórico do caso de estudo desta dissertação, a Capela das Almas. Seguidamente, são apresentados os trabalhos de intervenção e monitorização a que se pôde ter acesso nos registos da Venerável Irmandade das Almas e Chagas de São Francisco e no Sistema de Informação para o Património Arquitetónico (SIPA) da Direção Geral do Património Cultural desde 1982 a 2013.

No capítulo 4 é apresentada a inspeção que foi efetuada na Capela das Almas no presente ano. Esta teve como objetivo inventariar os danos existentes para, à posteriori, serem comparados com danos registados em inspeções anteriores da capela. Além disso, a inspeção permitiu ainda definir os locais mais adequados para instalar o sistema de monitorização de vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário e ferroviário. Ainda neste capítulo é exposto todo o procedimento realizado no laboratório tendo em vista uma escolha adequada da instrumentação a utilizar na monitorização.

O capítulo 5 debruça-se sobre a análise e validação das velocidades máximas obtidas confrontando-as com os limites sugeridos pelas normas analisadas no capítulo 2 e assim perceber se os danos observados na Capela das Almas são motivados pelas vibrações induzidas por veículos pesados e pelo metro da Estação do Bolhão.

Por fim, no capítulo 6 são sintetizados os principais resultados e são recomendados eventuais trabalhos futuros para serem realizados na Capela das Almas.

2

ANÁLISE DE NORMAS E ALGUNS CASOS DE ESTUDO

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo vão ser apresentados um conjunto de critérios de avaliação alusivos aos efeitos das vibrações em humanos e em edifícios. Particularmente, nos critérios normativos relativos a edifícios irá ser dada uma maior enfâse aos critérios que estipulam limites de vibrações para edifícios históricos, uma vez que o caso em estudo da presente dissertação é considerado como tal.

2.2. NOÇÕES BÁSICAS SOBRE VIBRAÇÕES

Vibração, seja proveniente de uma fonte sonora ou mecânica, é um movimento oscilatório de partículas ou conjunto de partículas relativamente a uma posição de equilíbrio inicial. Este movimento, segundo Rudder, citado por Selcuk e Cubukcu (2015), pode ser representado em termos de deslocamentos máximos (amplitude), velocidades instantâneas e acelerações, sendo a velocidade a medida usada universalmente para análise de vibrações.

Na maioria das normas, para quantificar a energia das vibrações admissíveis, é utilizado o pico da velocidade das partículas (PPV). O PPV é a velocidade máxima com que as partículas se deslocam num determinado local, habitualmente medida em mm/s. Esta pode ser obtida diretamente através da utilização de geofones ou pela integração do vetor aceleração somado nas três direções ortogonais (De Brito *et al*., 2015) quando utilizados acelerómetros como instrumento de medição. Este parâmetro permite analisar os efeitos provocados por vibrações geradas por várias fontes, como o desmonte com explosivos, tráfego rodoviário e ferroviário, cravação de estacas, sismos entre outros, assumindo especial relevância na estimação de ocorrência de danos devidos a vibrações num determinado edificado.

De acordo Sarsby (2000), as vibrações que afetam tanto os seres humanos como os edifícios podem ser classificadas em três tipos, consoante o tempo de propagação da onda:

- Vibrações Contínuas - A vibração é contínua quando durante um período de análise a mesma não é interrompida
- Vibrações Transitórias - A vibração transitória ocorre quando a variação da onda de propagação atinge um pico e rapidamente se atenua conforme a distância do ponto de origem da vibração. Este tipo de vibração pode ser repentina ou ocorrer e terminar gradualmente.
- Vibrações Intermitentes - A vibração intermitente ocorre quando existem pequenos incidentes vibratórios de pequena duração.

Segundo Hajek e Hein (2006), os níveis de vibração dependem da fonte, do meio de transmissão (normalmente o solo) e do recetor, estando estes três fatores intrinsecamente ligados uma vez que o tipo de estrutura que é afetada pelas vibrações, a distância da fonte a essa estrutura recetora e o tipo de condições geológicas influenciam a frequência de entrada no edifício e consequentemente o dano causado.

Relativamente às fontes de vibração, produzidas pelo Homem, podem ser de origem externa, tal como o tráfego rodoviário e ferroviário, atividades de construção que ocorram nas imediações ou mesmo dentro dos edifícios, cravação de estacas e eventual compactação do solo, explosões e outras da mesma índole. Por outro lado, também têm de ser tidas em conta as vibrações internas, ou seja, vibrações devido a máquinas e à própria atividade humana dentro das construções (Del Grosso e Basso, 2014). Os edifícios também podem experimentar excitações provocadas pela natureza, como é o caso do vento e da atividade sísmica. Dependendo da origem da vibração, esta vai determinar a frequência e a duração da mesma tendo direta influência nos efeitos ressonantes. Por outras palavras, vibrações de curta duração, têm tendência a provocar menos efeitos ressonantes enquanto que edifícios submetidos a períodos de excitação contínuos, por exemplo o tráfego, podem causar esses efeitos que são indesejáveis (Studer e Suesstrunk,1981). As vibrações induzidas por veículos irão ser abordadas em detalhe neste documento.

2.3. VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VEÍCULOS

As vibrações podem-se transmitir de dois modos: pelo ar e pelo solo. Conforme publicado por Watts e Hendriks , citado por Selcuk e Cubukcu (2015), as vibrações transmitidas pelo ar são causadas por ondas sonoras (quase impercetíveis) produzidas pelos motores dos veículos, enquanto que as vibrações transmitidas pelo solo são produzidas devido a irregularidades existentes na superfície de contacto com as rodas. Veículos pesados (comboio, metro, camiões e autocarros) ao atingirem essas irregularidades, tais como fissuras, lombas, buracos, tampas de saneamento desniveladas, provocam vibrações que se propagam em forma de ondas pelo solo e são transmitidas às fundações das estruturas das imediações (Basekar *et al*., 2015). Essa transmissão das ondas vibratórias vai depender do tipo de solo e da sua estratificação. Em geral propagam-se através de ondas de compressão (Ondas P) e ondas de corte (ondas S), ambas com velocidades numa direção apenas. As ondas P transmitem-se na direção longitudinal e caracterizam-se por ondas de maior velocidade de propagação, pequenas amplitudes e altas frequências e as ondas S são ondas transversais à direção de propagação com velocidades inferiores às das ondas P. Outro tipo de ondas são as ondas de superfície, que geralmente se dividem em ondas Rayleigh e ondas Love. As Rayleigh propagam-se nas duas direções e ondas Love apenas na direção do plano horizontal (De Brito *et al.*, 2015). Conforme a norma BS 7385-2 (1993) – *"Guide to damage levels from groundborne vibration"* - a velocidade de propagação das ondas vibratórias aumenta com a rigidez do solo, ou seja, em solo rígido as velocidades são superiores e desse modo as frequências naturais do sistema edifício-solo vão ser superiores (acontecendo o inverso com os solos moles). Quanto mais rígido o solo menor o amortecimento do mesmo.

Além disso, a velocidade com que as ondas se propagam é inversamente proporcional à deformação induzida nas fundações dos edifícios. Isto é, se as ondas de volume (P e S) são as que têm uma velocidade de propagação mais elevada, contrariamente às ondas superficiais (Rayleigh e Love), então estas últimas serão as ondas que conduzirão a maiores deformações no edifício. Por outro lado, é necessário ter em conta potenciais danos indiretos desencadeados por assentamentos diferenciais devido à compactação do solo.

No que respeita a normas relacionadas com os efeitos dos movimentos vibratórios, estas não têm apenas em consideração os níveis de vibração para danos em edifícios. Também existe um conjunto de critérios de avaliação que têm conta o conforto dos ocupantes e danos nos conteúdos dos edifícios.

2.4. CRITÉRIOS NORMATIVOS DE AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

2.4.1. RESPOSTA HUMANA

Os seres humanos, como ocupantes dos edifícios, devem estar expostos a níveis de vibração quase impercetíveis para que estes não provoquem desconforto. Este desconforto depende das características pessoais de cada indivíduo. Segundo a norma alemã DIN 4150-2 (1999) esses fatores incluem:

- O estado de saúde psicológico e físico do indivíduo;
- O nível de vibração a que a pessoa se acostumou e a relação com essa vibração;
- As atividades a realizar durante o período em que estejam a ocorrer movimentos vibratórios;
- Os efeitos secundários, como por exemplo os movimentos visíveis em relação a objetos dentro do edifício.

Esta norma avalia os efeitos das vibrações periódicas e não periódicas nos seres humanos, estabelecendo uma gama de limites aceitáveis de frequências entre 1 Hz a 80 Hz. Para tal utiliza um parâmetro de medição dominado por KB:

$$KB = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v_{máx}}{\sqrt{1 + (5{,}6/f)^2}} \quad (1)$$

onde f é a frequência (Hz) e $v_{máx}$ a velocidade máxima (mm/s).

Posteriormente, KB é comparado com os valores limites impostos pela norma (Tabela 1) que têm em consideração os seguintes parâmetros de vibração:

- Tipo de uso do edifício
- Duração e frequência da exposição
- Hora do dia da ocorrência

Outra norma internacional que aborda os efeitos das oscilações no ser humano é a ISO 2631, *Evaluation of human exposure to whole-body vibration* (ISO 2631-1, 1997; ISO 2631-2, 2003). Esta norma tem como objetivo definir métodos para quantificar os níveis de vibração no corpo humano inteiro, sendo que não contem limites de exposição nem cobre os efeitos no desempenho dos indivíduos face aos movimentos vibratórios.

Na ISO 2631-1 (1997) são definidos métodos para avaliar as vibrações relativamente à saúde, conforto, perceção e à ocorrência de enjoos. O intervalo de frequências percetíveis pelo ser humano apresentados são os seguintes:

- 0.5 Hz a 80 Hz para a saúde, conforto e perceção
- 0.1 Hz a 0.5 Hz para ocorrência de enjoos devido ao movimento

A medição da vibração deve ser de acordo com os três eixos ortogonais de referência (x, y, z). Esse sistema de eixo é posicionado no corpo do ser humano a partir do ponto onde são transmitidas as vibrações, isto é, as medições devem ser efetuadas o mais próximo do ponto/área na qual entram as

vibrações no corpo (Figura 1). Para além disso, nesta versão já são tidas em conta as vibrações rotacionais, mantendo-se a utilização de valores de aceleração eficaz relativamente às vibrações translacionais (Melo, 2006).

Tabela 1 - Valores aceitáveis de KB para edifícios residenciais de acordo com a norma DIN 4150-2

Zona do Edificado	**Período**	**Valores aceitáveis para KB**	
		Vibrações contínuas ou repetitivas	Vibrações pouco frequente
Puramente residenciais, complexos habitacionais, estâncias de férias	Diurno	0.2 (0.15*)	4
	Noturno	0.15(0.1*)	0.15
Aldeia e pequenas empresas, centros urbanos	Diurno	0.3(0.2*)	8
	Noturno	0.2	0.2
Negócios e comércio (incl. escritórios)	Diurno	0.4	12
	Noturno	0.3	0.3
Industrial	Diurno	0.6	12
	Noturno	0.4	0.4
Áreas de exceção (de acordo com o conteúdo residencial)	Diurno	0.6	4 - 12
	Noturno	0.4	0.15 - 0.4

(*) Os valores entre parêntesis devem ser cumpridos se os edifícios forem excitados horizontalmente com frequências inferiores a aproximadamente 5 Hz

Os métodos de avaliação descritos na norma necessitam que seja feita previamente uma ponderação em frequências da aceleração registada utilizando curvas de ponderação (W). A estas curvas são aplicados fatores multiplicativos, k, que dependem do eixo de vibração, da posição do indivíduo e do critério em análise (saúde, conforto, perceção e enjoo ao movimento), sendo necessária a aplicação de filtros. Para as curvas W_k, W_d, W_c, W_e e W_j (Tabela 2), relativas à saúde, conforto e perceção, é utilizado um filtro passa-alto de 0,4 Hz e outro passa-baixo de 100 Hz, e na curva relativa ao enjoo, W_f, os limites da banda passa-alto e passa-baixo são, respetivamente, 0,08 Hz e 0,63 Hz.

Na segunda parte da presente norma, ISO 2631-2 (2003), a medição das vibrações é efetuada em relação ao edifício, isto é, a posição do ocupante não precisa de ser definida. Nesta norma é estabelecida uma curva de ponderação W_m aplicável num intervalo de frequências de 1Hz a 80Hz.

Tabela 2 - Direção, posição e critério referente a cada curva de ponderação

Curva de Ponderação	
W_k	Para a direção z e para a direção vertical com o individuo deitado relativamente aos critérios de saúde, conforto e perceção
W_d	Para a direção x e y e direção horizontal para individuo deitado relativamente aos critérios de saúde, conforto e perceção
W_f	Relativo ao enjoo ao movimento
W_c	Medições das vibrações pelas costas
W_e	Medições das vibrações rotacionais
W_j	Medições das vibrações sob a cabeça de uma pessoa deitada

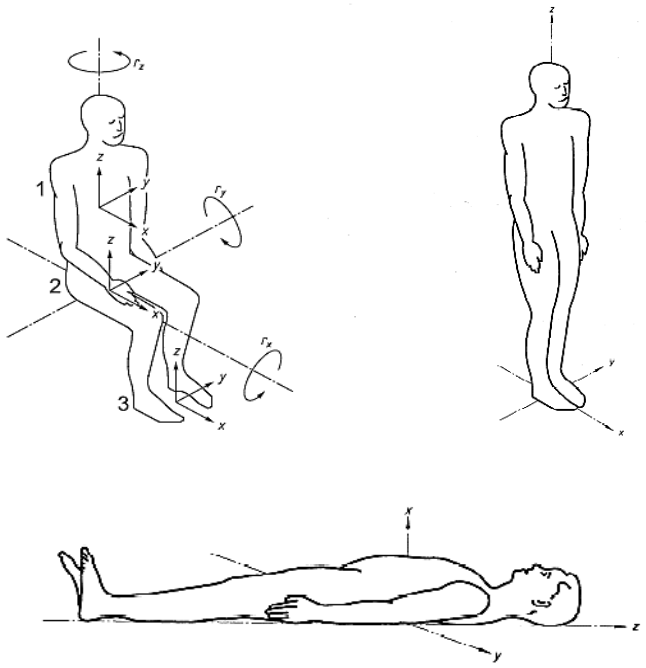


Figura 1 - Sistema de eixos utilizado segundo a norma ISO 2631-1 para avaliação das vibrações no corpo humano

A norma britânica BS 6472 (2008) é outra norma que tem como finalidade avaliar as vibrações dos edifícios no que diz respeito aos efeitos sobre o ser humano adotando uma escala de frequências de 0.5 Hz a 80 Hz. Esta descreve métodos, em que a grandeza medida é a aceleração, que têm o objetivo de determinar o valor da dose de vibração (VDV) que o indivíduo experimenta. Esse parâmetro é definido pela seguinte equação:

$$VDV_{b/d,day/night} = \left(\int_0^T a^4(t)dt \right)^{0.25} \quad (2)$$

Onde:

- $VDV_{b/d,day/night}$ é o valor da dose de vibração expresso em $m/s^{-1.75}$
- $a\,(t)$ é a aceleração ponderada em frequência, em m/s^{-2}, usando as curvas de ponderação W_b ou W_d adequadamente, em que W_b é referente ao movimento vertical e W_d ao movimento horizontal.
- T é o período total do dia ou noite, em segundos (s), durante o qual a vibração pode ocorrer.

O valor do VDV, consoante a norma, é bastante influenciado pela magnitude de vibração comparativamente à duração da mesma, podendo uma duplicação/redução equivaler a um aumento/diminuição da duração de exposição até dezasseis vezes. Os valores que devem ser respeitados encontram-se indicados na tabela 3.

Tabela 3 - Gama de valores de VDV ($m/s^{-1.75}$) associados a diferentes probabilidades de queixas em edifícios residenciais (BS 6472-1, 2008)

Local e Período	Reduzida ocorrência de queixas	Possível ocorrência de queixas	Provável ocorrência de queixas
Edifícios residenciais Período diurno – 16h	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 1,6
Edifícios residenciais Período noturno – 8h	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8

2.4.2. EFEITOS DAS VIBRAÇÕES EM EDIFÍCIOS

Os movimentos oscilatórios podem causar vários tipos de danos nas estruturas que estão nas imediações dos mesmos. Estes níveis de danos variam para cada edifício, uma vez que o tipo de construção, material e condição do mesmo, influenciam a resposta a esses mesmos movimentos.

Existem dois tipos de danos, os arquitetónicos e os estruturais, que segundo as diversas normas técnicas são designados por danos estéticos, menores e maiores. Dentro dos danos arquitetónicos estão incluídos os danos estéticos que se representam pela formação de fissuras muito finas ou abertura das já existentes em superfícies de gesso, reboco e argamassas e os danos menores definidos como formação de fissuras grandes ou mesmo queda de gesso, reboco e revestimentos cerâmicos. Os danos maiores são danos estruturais que ocorrem nos elementos estruturais do edifício.

A norma suíça SN 640 312 define níveis de vibração admissíveis em edifícios, a fim de que a ocorrência de danos leves seja pouco provável. No entanto do ponto de vista da economia esses limites não deveriam ser tão restritos e por isso noutros países europeus esses limites são ligeiramente superiores (Studer e Suesstrunk,1981).

Uma vez que as estruturas, dependendo da vulnerabilidade, reagem de maneiras diferentes às vibrações a que estão sujeitas, esta norma faz a distinção de quatro classes de construção, referidas na tabela 4.

Tabela 4 - Classes das Estruturas de acordo com SN 640 312 (Studer e Suesstrunk,1981)

Classe	
I	Construções reforçadas de betão e aço (sem reboco) como edifícios comerciais e industriais, pontes, torres, chaminés, muros de contenção e condutas superficiais
II	Edifícios com lajes e cave sem betão, paredes em betão ou alvenaria, muros de alvenaria. Estruturas subterrâneas como cavernas, túneis, galerias com forro de alvenaria. Condutas enterradas
III	Edifícios com caves e lajes em betão com vigas de madeira nos andares superiores, paredes em alvenaria.
IV	Edifícios que são especialmente sensíveis ou merecem proteção.

Repara-se que os limites de velocidades sugeridos pela norma (Tabela 5) podem nunca ser excedidos. No entanto, se os edifícios, especialmente em edifícios mais antigos, estiverem expostos a vibrações de longa duração (anos), acabam por sofrer danos por fadiga da estrutura. Para isso, conforme a norma, estes edifícios devem ser colocados em categorias inferiores.

Esta norma abrange vibrações induzidas por explosões, máquinas e equipamentos de construção e tráfego rodoviário e ferroviário, não tendo em consideração os efeitos nos seres humanos, equipamentos sensíveis nem a efeitos relacionados com o solo.

Outra norma internacional de referência que tem como finalidade quantificar os efeitos das vibrações na estrutura e de fornecer valores de orientação para que não ocorra danos aquando da estrutura em serviço é a parte 3 da norma alemã DIN 4150 (1999).

Esta norma, tal como a norma descrita anteriormente, classifica as estruturas consoante o tipo de construção e o estado de fragilidade/conservação do edifício. A classificação é feita em três categorias:

- Categoria I – edifícios comerciais e industriais
- Categoria II – Edifícios residenciais
- Categoria III – Estrutura de elevada sensibilidade às vibrações (edifícios históricos)

Tabela 5 - Valores limite (mm/s) sugeridos pela norma SN 640 312 (Moutinho, 2007)

Classe	**Vibrações induzidas pelo movimento de máquinas, tráfego e trabalhos de construção**		**Vibrações provocadas por trabalhos com explosivos**	
	f (Hz)	$V_{máx}$ (mm/s)	f (Hz)	$V_{máx}$ (mm/s)
I	10 – 30	12	10 – 60	30
	30 – 60	12 -18*	60 – 90	30 – 40**
II	10 – 30	8	10 – 60	18
	30 – 60	8 – 12*	60 – 90	18 – 25**
II	10 – 30	5	10 – 60	12
	30 – 60	5 – 8*	60 – 90	12 – 18**
IV	10 – 30	3	10 – 60	8
	30 – 60	3 – 5*	60 – 90	8 – 12**

* O valor mais baixo aplica-se a 30Hz e o valor superior a 60 Hz. Para frequências intermédias é necessária interpolação.

** O valor mais baixo corresponde a 60 Hz e o valor superior a 90 Hz. Para frequências intermédias é necessária interpolação.

Além disso, os limites indicados dependem também do tipo de duração da vibração, isto é, se a vibração tem curta duração ou longa duração. Na tabela 6, bem como na figura 2, estão descritos os níveis de velocidade tanto para medições na base dos edifícios como no piso mais elevado para vibrações de curta duração. Em relação às vibrações de longa duração a norma considera limites inferiores, considerando para qualquer frequência, velocidades limite de vibração no plano horizontal para pisos mais elevados de 10 mm/s, 5 mm/s e 2,5 mm/s, respetivamente para a categoria I, II e III.

Tabela 6 - Velocidades limite (mm/s) para vibrações de curta duração sugeridas pela norma DIN 4150-3 (1999)

Categoria da Estrutura	**Velocidade de vibração na base do edifício (mm/s)**			**Velocidade de vibração no plano horizontal no piso mais elevado do edifício (mm/s).**
	1 Hz a 10 Hz	10 Hz a 50 Hz	50 Hz a 100* Hz	Todas as frequências (Hz)
I	20	20 a 40	40 a 50	40
II	5	5 a 15	15 a 20	15
III	3	3 a 8	8 a 10	8

*****As frequências acima de 100 Hz, os valores indicados nesta coluna podem ser usados como valores mínimos

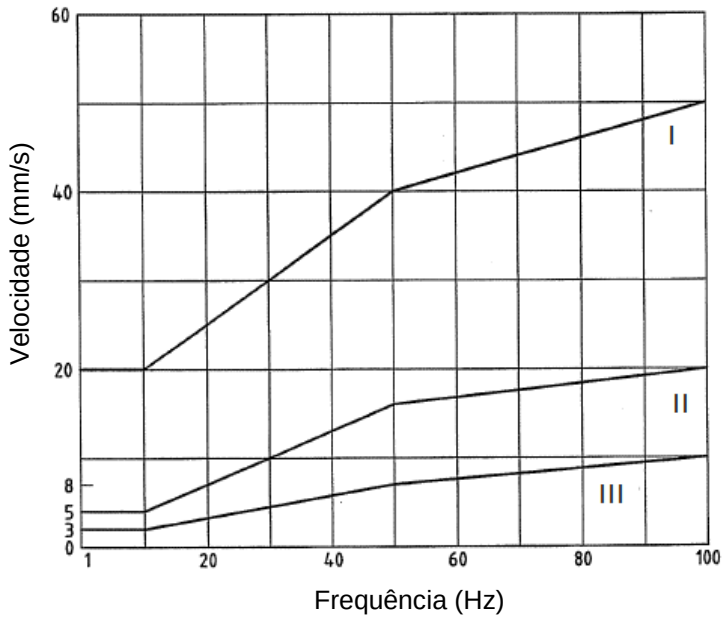


Figura 2 - Curvas das velocidades limite (mm/s) para vibrações de curta duração medidos na base do edifício sugeridas pela norma DIN 4150-3 (1999)

Outra norma que avalia os efeitos das vibrações nos edifícios é a norma britânica BS 7385. A primeira parte desta norma BS 7385 (1990) – *Guide for measurement of vibrations and evaluations of their effects on buildings* – é muito idêntica à norma ISO 4866 (1996). Esta parte é direcionada para a resposta estrutural sendo que inclui métodos analíticos de medição para a determinação da frequência, amplitude e duração de vibrações induzidas tanto pela natureza como pelo homem. Por abranger sismos e ventos, explosões, máquinas e equipamento de construção e tráfego, a norma indica uma gama de frequências muito extensa, entre 0,1 Hz e 500 Hz. No entanto os movimentos vibratórios provocados pelo homem apenas se inserem na faixa entre 1 Hz e 150 Hz. A tabela 7 apresenta o que a norma recomenda em termos de intervalos de valores típicos de frequência e velocidade que cobrem a resposta estrutural relativa a várias fontes.

Para avaliação dos danos nos edifícios, a norma classifica as estruturas em três classes de acordo com a sua provável reação às vibrações transmitidas através do solo, tendo em consideração o tipo de construção, a fundação, solo e a importância do mesmo. Num primeiro grupo engloba todos os edifícios da vida quotidiana (edifícios hospitalares, habitações, escolas, escritórios, fábricas), noutro grupo os edifícios públicos (igrejas, templos, mesquitas, câmaras municipais) e num terceiro os edifícios antigos e com valor arquitetónico, arqueológico e histórico.

Tabela 7 - Intervalos de resposta das estruturas a vários tipos de fontes de vibração indicados pela norma BS 7385-1 (1990)

Tipo de Vibração	Frequência (Hz)	Amplitude (μm)	Velocidade da partícula (mm/s)	Aceleração da partícula (m/s^2)
Tráfego (Rodoviário, ferroviário)	1 a 80	1 a 200	0,2 a 50	0,02 a 1
Explosões	1 a 300	100 a 2500	0,2 a 500	0,02 a 50
Cravação	1 a 100	10 a 50	0,2 a 50	0,02 a 2
Máquinas exteriores	1 a 300	10 a 1000	0,2 a 50	0,02 a 1
Máquinas Interiores	1 a 1000	1 a 100	0,2 a 30	0,02 a 1
Atividade Humanas				
Impacto	0,1 a 100	100 a 500	0,2 a 20	0,02 a 5
Direto	0,1 a 12	100 a 5000	0,2 a 5	0,02 a 0,2

A segunda parte desta norma BS 7385-2 (1993) – *Guide to damage levels from groundborne vibration* – fornece orientações relativas à avaliação de danos em estruturas devido a várias fontes (excluindo fontes de origem natural), definindo valores limite de velocidade de vibração das partículas. Este limite dos níveis de vibrações tem como finalidade limitar ao mínimo o risco de ocorrência de dano no edifício.

Na tabela 8, assim como na figura 3, apresentam-se os valores sugeridos pela norma relativamente a danos estéticos nas estruturas causados por vibrações transitórias que não provocam efeitos de ressonância, medidos na base do edifício. Caso a vibração seja contínua os valores da tabela devem ser reduzidos pelo menos para metade dos valores indicados, uma vez que pode ocorrer uma amplificação dinâmica principalmente em frequências muitos baixas. Em relação aos danos menores, estes podem ocorrer quando a magnitude da vibração é superior ao dobro dos valores tabelados. Por fim os danos maiores aparecem para valores superiores a quatro vezes os valores indicados na tabela. Para os edifícios históricos, a norma refere que eventualmente podem ser aplicados limites para este tipo de estrutura, sendo que não indica valores para tal.

Tabela 8 - Valores limite para danos estéticos induzidos por vibrações transitórias sugeridos pela norma BS 7385-2 (1993)

Tipo de Construção	**Velocidade de vibração das partículas (mm/s)**	
	4 Hz a 15 Hz	≥ 15 Hz
Estruturas reforçadas ou estruturas industriais e comerciais pesados	50 mm/s	50 mm/s
Estruturas não reforçadas ou estruturas residenciais ou edifícios comerciais leves	15 mm/s para 4Hz e 20 mm/s para 15 Hz	20 mm/s para 15 Hz e 50 mm/s para 40 Hz e acima

Para estruturas do tipo II, para frequências inferiores a 4 Hz, não deve ser ultrapassado o valor de deslocamento máximo de 0,6 mm.

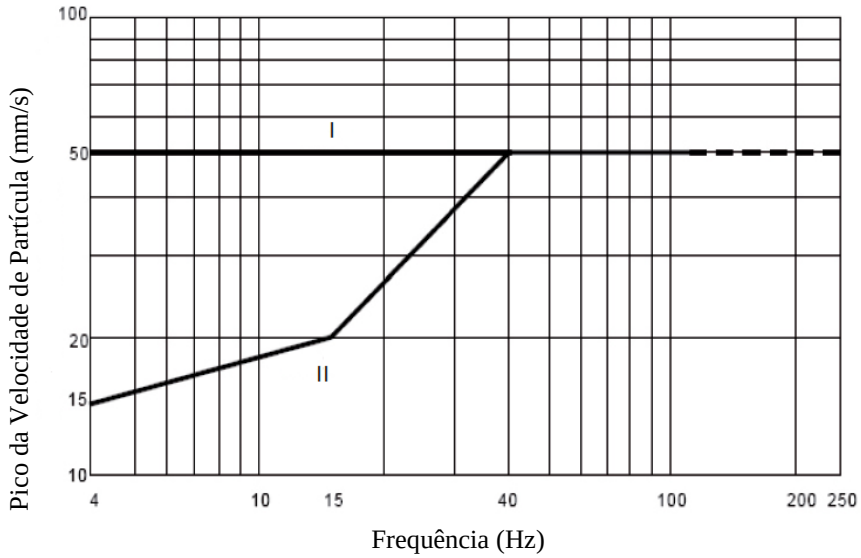


Figura 3 - Valores limite para danos estéticos induzidos por vibrações transitórias, sugeridos pela norma BS 7385-2 (1990)

As quatro normas descritas anteriormente são, na sua maioria, a base de muitos outros documentos. No entanto, para além destas, existem outras que indicam limites em relação à velocidade máxima das partículas devido a vibrações.

No que diz respeito aos Estados Unidos da América não foram encontradas normas relativas a danos em edifícios causados por vibrações. No entanto a Autoridade Federal do Trânsito (FTA) recomenda alguns limites (Tabela 9) de velocidade de pico para quatro classes de edifícios. No estado da Califórnia, o Departamento dos Transportes (Caltrans) sugeriu outros limites (Tabela 10). Para além de terem em consideração várias classes para edifícios, também fazem a distinção relativamente ao tempo de propagação da onda vibratória gerada pela fonte : Contínua, Transitória ou Intermitente (Bonterra PSOMAS, 2014).

Tabela 9 - Valores de velocidade de vibração das partículas de acordo com a Autoridade Federal do Trânsito (Bonterra PSOMAS, 2014)

Classe da Estrutura	**Pico de Velocidade da Partícula (mm/s)**
I Estruturas Reforçadas com betão, aço ou madeira (sem reboco)	12,7
II Estruturas projetadas de betão e alvenaria (sem reboco)	7,62
III Estruturas não-projetadas de madeira e alvenaria	5,08
IV Edifícios extremamente suscetíveis a danos por vibração	3,05

Tabela 10 - Valores de velocidade de vibração das partículas segundo o Departamento de Transportes da Califórnia (Bonterra PSOMAS, 2014)

Classe da Estrutura	**Pico de Velocidade da Partícula (mm/s)**	
	Fontes Transitórias	Fontes Contínuas e Intermitentes
Edifícios históricos extremamente frágeis, ruínas, monumentos antigos	3,05	2,03
Edifícios frágeis	5,08	2,54
Edifícios históricos e antigos	12,7	6,35
Estruturas residenciais mais antigas	12,7	7,62
Estruturas residenciais recentes	25,4	12,7
Edifícios industriais / comerciais modernos	50,8	12,7

A norma sueca SS 025211 fornece limites de vibrações relativas à cravação de estacas, escavações e compactação. Estes limites sugeridos, assentes na experiência e observação de danos da estrutura, calculam-se através da equação 3 (Milititsky *et al.*, 2015).

$$v = v_0 F_b F_m F_g \quad (3)$$

Onde:

- v é a velocidade de vibração vertical máxima na base da fundação (mm/s)
- vo é a parcela vertical da velocidade de vibração não corrigida (mm/s)
- Fb, Fm e Fg são fatores tabelados relativos ao edifício, material e fundação, respetivamente.

Esta norma é a base da norma norueguesa NS 8141 (Bernardo e Dinis da Gama,2006). Em relação à norma Italiana UNI 9916 trata-se de uma norma que não indica valores limites, apenas orienta para a utilização de métodos de avaliação e medição dos movimentos vibratórios e que tem como referência a norma alemã DIN 4150. No que se refere a França, as indicações referentes a vibrações são propostas por órgãos diferentes, das quais uma pelo Ministério do Ambiente (1986) e a outra pela AFTES (1974) – Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain. Esta última, consoante a qualidade mecânica da estrutura (baixa (A), média (B) e alta (C)) e a velocidade de propagação das ondas longitudinais no solo define limites para a velocidade das partículas, conforme se observa na tabela 11. Em contrapartida o Ministério do Ambiente (Tabela 12) designa as classes dos edifícios em resistentes, sensíveis e muito sensíveis, sendo que os níveis de vibração sugeridos dependem da frequência (Nunes e Alves da Costa, 2006).

Tabela 11 - Valores de velocidade de vibração das partículas sugeridos pela AFTES

VL (m/s)	**Velocidade de vibração das partículas (mm/s)**		
	A	B	C
1500	2,5	7,5	25,0
3000	5,0	15,0	50,0
4500	7,5	22,5	75,0

Tabela 12 - Valores de velocidade de vibração das partículas sugeridos pelo Ministério do Ambiente

Tipo de Edificado	**Velocidade de vibração das partículas (mm/s)**		
	4 Hz a 8 Hz	8 Hz a 30 Hz	30 Hz a 100 Hz
Resistente	8	12	15
Sensível	6	9	12
Muito sensível	4	6	9

Relativamente aos critérios australianos, são sugeridos diferentes limites para níveis máximos de velocidade das vibrações, em duas normas distintas. Segundo a CA 23-2183, citada por Nieble (2017), para edifícios comerciais e industriais, estruturas de betão ou estruturas metálicas, é sugerido um deslocamento máximo de 0,2 mm que corresponde a uma velocidade das partículas de 12,5 mm/s para uma frequência de 10 Hz e 6,25 mm/s para uma frequência de 5 Hz. Em relação a edifícios residenciais com poucos andares indica um limite de velocidade máxima das partículas de 19 mm/s para frequências maiores que 15 Hz e para edifícios históricos, monumentos e edifícios com valor patrimonial indica um deslocamento de 0,2 mm para frequências inferiores a 15 Hz. Ainda de acordo com Nieble (2017), a norma AS 2183, para o mesmo tipo de edifícios descritos anteriormente, são sugeridos limites de 25 mm/s, 10 mm/s e 2 mm/s, respetivamente.

No que diz respeito à norma vigente em Portugal, NP 2074 (2015), esta tem como objetivo estabelecer o valor limite para a velocidade de vibrações induzidas por explosões, cravação de estacas e outras operações da mesma natureza em edifícios habitacionais, industriais e de serviços, igrejas e monumentos. Não compreende critérios de avaliação em relação à comodidade para os seres humanos, nem para equipamentos sensíveis. A tabela 13 descreve o conteúdo da norma relativamente aos limites para a velocidade das partículas em função da frequência dominante registada e o tipo de estrutura. A classificação de acordo com a norma, deve ser realizada de um modo conservativo, conforme o estado de conservação do edifício, esbelteza e valor patrimonial. Os três tipos de estruturas abordadas na norma são os seguintes:

- Sensíveis: Todas as edificações antigas, esbeltas, monumentos e infraestruturas de transporte;
- Correntes: Edifícios com estrutura comum (habitações e escritórios) e pouco esbeltos, isto é, que a relação altura-menor dimensão da base seja maior que 2;
- Reforçadas: Edifícios recentes em betão armado e estruturas metálicas (edifícios industriais).

Tabela 13 - Valores limite para a velocidade de vibração (mm/s) recomendados pela norma NP 2074 (2015)

Tipo de Estrutura	**Velocidade de vibração das partículas (mm/s)**		
	f ≤ 10 Hz	10 Hz < f ≤ 40 Hz	f > 40 Hz
Sensíveis	1,5	3,0	6,0
Correntes	3,0	6,0	12,0
Reforçadas	6,0	12,0	40,0

Para o cálculo do valor da velocidade máxima, $V_{máx}$, relativamente ao período de registo efetuado pelo transdutor (de acordo com a norma deve ser triaxial) e que deve ser comparado com os valores da tabela 13, escolhe-se o maior valor de cada direção desse registo e utiliza-se a seguinte expressão:

$$V_{máx} = \left| \sqrt{v_L^2(t) + v_V^2(t) + v_T^2(t)} \right| \tag{4}$$

onde o índice L, refere-se a uma direção horizontal do eixo do transdutor, preferencialmente dirigido para a fonte de vibração, V outro eixo com direção vertical e T um eixo na direção transversal.

2.5. ALGUNS CASOS DE ESTUDO RELATIVOS A VIBRAÇÕES INDUZIDAS NOS EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

2.5.1. INTRODUÇÃO

Perante a importância da conservação dos edifícios históricos é necessário proceder a estudos de investigação que permitam avaliar os danos causados por vibrações induzidas por tráfego no património. De modo a compreender a metodologia neste tipo de estudos e quais as ilações a tirar dos mesmos, foram analisados alguns casos um pouco por todo o mundo, nomeadamente os estudos realizados nos seguintes monumentos:

- Monumento aos Mártires (Chengdu, China)
- Torre Sineira (Xi'an, China)
- Galleria Vasariana (Florença, Itália)
- Palácio de São Teodoro (Nápoles, Itália)
- Palácio de Santa Cruz (Valladolid, Espanha)
- Vários monumentos históricos (Delhi, Índia)

Desta listagem foram escolhidos dois casos de estudo que se expõem de seguida.

2.5.2. MONUMENTO AOS MÁRTIRES – CHENGDU, CHINA

No artigo referente a este estudo (Ma *et al*., 2011) é analisada a influência das vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário e ferroviário a 80 e 50 metros, respetivamente, deste monumento histórico. O monumento, composto por uma estrutura de alvenaria de tijolo com cerca de 30 metros, foi construído poucos anos após a considerada primeira Revolução Chinesa (Revolução Xinhai de 1911) no People's Park em Chengdu. O estudo foi realizado após a construção da linha 2 do metro de Chengdu, a fim de avaliar se as vibrações originadas tanto pelo metro, assim como pelo conjunto do metro mais os veículos, ultrapassam os níveis de vibração permitidos pelo governo chinês. Na maioria das normas internacionais sobre patologias causadas por vibrações aparecem como referência limites de velocidade máxima das partículas (PPV) sendo por isso usado este parâmetro na avaliação e comparação dos valores.

A norma em vigor na China – Código Nacional Chinês – tem como limite de PPV o intervalo entre 0,1 e 0,75 mm/s. No entanto como o edifício em estudo tem valor histórico e patrimonial, o valor admissível de PPV horizontal na extremidade superior do mesmo foi entre 0,15 e 0,25 mm/s. Porém, uma vez que, as medições da reposta às vibrações medidas no topo do monumento não são fáceis de ser obtidas, foi utilizada uma fórmula para relacionar a PPV no topo com a da fundação:

$$V_{máx} = V_r D \tag{5}$$

Onde:

- $V_{máx}$ corresponde à PPV horizontal na parte superior do monumento;
- V_r é a PPV horizontal na fundação do edifício;
- D é o fator de amplificação dinâmica, ao que foi atribuído um valor entre 4,5 e 5,5 neste estudo.

Sendo assim, o valor da velocidade máxima de vibração das partículas na base do edifício situa-se entre 27,27 e 55,56 μm/s. Contudo, segundo o artigo, para efetuar uma avaliação de uma resposta onde são incluídos os efeitos de diferentes tipos de veículos, é mais útil utilizar a raiz do valor quadrático médio da velocidade (RMS). Para determinar esse valor, apenas é necessário dividir o valor da velocidade de pico por um fator de crista, que no estudo foi considerado como sendo 5 com base em considerações estatísticas. Desta forma, para que as vibrações estejam em conformidade com os critérios aqui expostos, o valor máximo da velocidade RMS na direção horizontal na fundação tem como limite mínimo 5,45 μm/s e máximo de 11,11 μm/s.

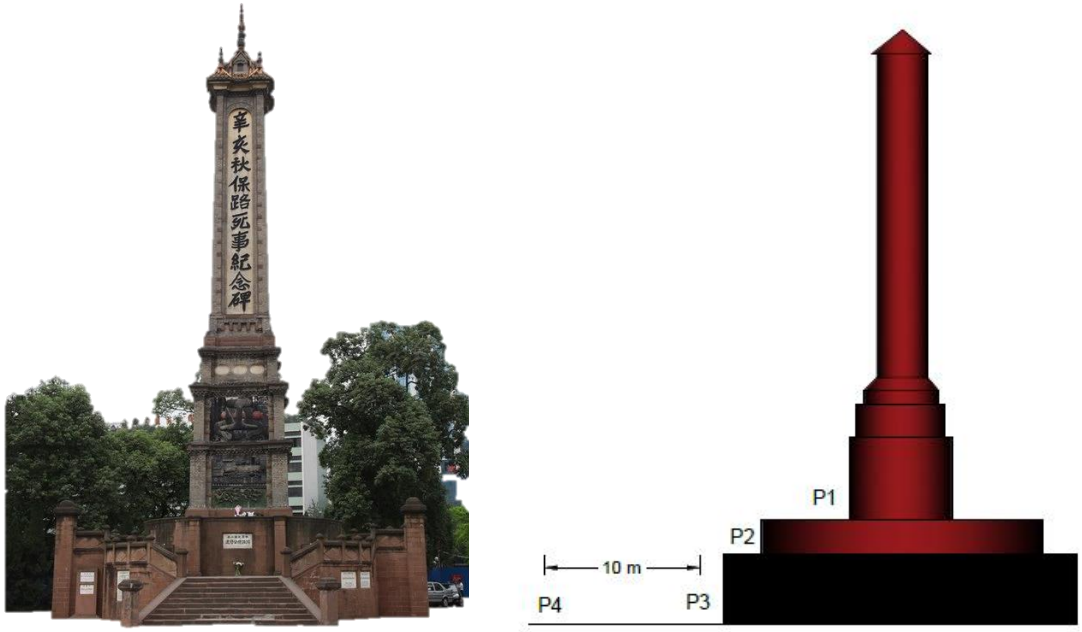


Figura 4 - Monumento do caso de estudo (adaptado de Ma *et al*., 2011) com respetivo esquema da posição dos acelerómetros de P_1 a P_4

Posto isto, para efetuar as medições das vibrações que afluem ao monumento através da propagação pelo solo, foram colocados acelerómetros em quatro pontos como demonstra na figura 4. Cada ponto com acelerómetros na direção horizontal e vertical, sendo a medição horizontal paralela à rua em estudo. Após a integração das acelerações induzidas pelo tráfego rodoviário obtidas de pelo menos 10 resultados, os resultados médios finais das velocidades são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – Resultados médios finais das velocidade registados nos pontos de 1 a 4

Ponto de medição	**PPV (mm/s)**		**Velocidade RMS (μm/s)**	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
1	0,0201	0,0454	4,13	10,08
2	0,0199	0,0405	4,801	9,09
3	0,0380	0,0431	7,12	9,24
4	0,0516	0,0444	9,42	10,25

Relativamente às vibrações induzidas pelo metro, situado a cerca de 50 metros do monumento, foi utilizado um programa de elementos finitos a fim de prever a resposta do monumento às vibrações induzidas pelo metro a diferentes velocidades, assim como a influência de diferentes fixadores de carris na propagação das vibrações pelo solo.

Levando em consideração estes aspetos, perante a análise dos dados obtidos, os autores concluíram que fixadores com menor rigidez tinham uma capacidade maior de absorção das vibrações. Além disso, foi efetuada uma análise comparativa entre a velocidade RMS no ponto 1 e a rigidez de diversos fixadores e, para o conjunto "metro + tráfego rodoviário", o limite mínimo da velocidade para vibrações estabelecido (5,45 μm/s) não foi cumprido. No entanto, avaliando a influência da velocidade sem ter em linha de conta o tipo de fixadores, constatou-se que uma redução da velocidade de 72 para 65 Km/h, a atenuação era bastante acentuada sendo que abaixo dos 58 Km/h a velocidade de vibração (tendo em consideração a contribuição do tráfego rodoviário) foi cumprido o limite mínimo de 5,45 μm/s imposto pela norma chinesa.

2.5.3. Palácio de São Teodoro – Nápoles, Itália

O artigo que irá ser exposto nas próximas páginas de Crispino e D'Apuzzo (2001), é referente a um caso de estudo de um edifício histórico em Nápoles onde se realizaram medições de vibrações induzidas por tráfego rodoviário de veículos pesados a diferentes velocidades. Conforme referenciado neste artigo, num estudo anterior de autoria de Watts, mostrou-se que as principais vibrações percetíveis são induzidas por veículos pesados e que as mesmas são amplificadas com a velocidade a que o mesmo se desloca, assim como pela profundidade/altura das irregularidades existentes na superfície de contacto com o veículo. O estudo verificou que se a anomalia da estrada tiver uma profundidade/altura de cerca de 20 mm a uma distância do edifício de 5 m, na passagem de um veículo pesado pela mesma, este provoca vibrações que são sentidas no edifício, sendo que nos pisos superiores a amplificação é maior. Segundo Chiostrini *et al.* (1970), alguns autores defendem que a velocidade de pico das partículas no solo pode atingir até 5 mm/s causando danos arquitetónicos.

Através de dados adquiridos em simulações e medições, esse estudo desenvolveu um modelo em que tem em conta o tipo de terreno, a velocidade do veículo pesado, a altura da irregularidade e a distância desta ao edifício, com vista à determinação da velocidade vertical máxima da partícula (PPV) ao nível da fundação:

$$PPV_{vertical} = 0.028\, a \left(\frac{v}{48}\right) t\, p \left(\frac{r}{6}\right)^{x} \quad (6)$$

onde,

- a é máxima profundidade/altura da irregularidade (mm)
- v diz respeito à velocidade máxima esperada para um veículo pesado (km/h)
- t é um fator de escala relativo ao tipo de terreno que se encontra fixado na tabela 15
- p representa um índice que relaciona a irregularidade da estrada com a passagem do veículo. Assume o valor de 0,75 quando a irregularidade afeta apenas um rodado (esquerdo ou direito) e valor de 1 quando afeta os dois.
- r corresponde à distância entre a irregularidade e a fundação do edifício (m)
- x descreve o amortecimento da vibração ao longo da distância que a mesma percorre. Os valores estão representados na tabela 15.

Tabela 15 - Valores dos coeficientes x e t para a aplicação na fórmula desenvolvida por Watt

Tipo de Solo	x	t
	Valores médios	
Turfa	1,19	3,84
Aluvião	0,79	7,07
Argila de Londres	1,06	3,10
Areia/Cascalho	0,74	0,94
Argila de Boulder	0,93	0,43
Calcário	1,08	0,10

O edifício histórico que foi objeto de estudo deste artigo foi o Palácio de S. Teodoro de 1826, situado junto à uma das ruas com mais volume de tráfego de Nápoles – Riviera di Chiaia. Aquando da realização do estudo, alguns pisos já tinham sido sujeitos a reforços estruturais com recurso a vigas de aço, nomeadamente o primeiro e segundo pisos.

Para cada local escolhido para a localização de estações de medição de velocidades de vibração das partículas foram utilizados três geofones (dois na direção horizontal, x e y; um na direção vertical, z). Além desta instrumentação, foram registadas as velocidades e comprimentos dos veículos pesados.

Analisando os valores medidos na direção vertical das cinco estações colocadas constatou-se que as velocidades relativas às estações colocadas no centro dos pisos do segundo andar apresentaram uma diferença bastante acentuada relativamente às outras três estações. Esta diferença, segundo os autores, pode ser em virtude de nos pisos a flexibilidade na direção vertical ser maior comparativamente às paredes. Em relação às velocidades na direção horizontal observou-se uma diminuição da ordem de grandeza. Este decréscimo era de esperar, dado que as vibrações se propagam maioritariamente como ondas de superfície em que a direção principal é a vertical. Além disso, as direções horizontais têm

maior rigidez o que vem de encontro com a redução significativa dos valores. De notar ainda que a gama de frequências para a maioria dos dados adquiridos foi entre 8 e 12 Hz.

Com base nos resultados obtidos, foi efetuada uma avaliação desses valores com os valores limite admissíveis pelas normas internacionais, no que diz respeito a danos arquitetónicos em edifícios históricos. A norma alemã DIN 4150-3 e a norma italiana UNI 9916, para frequências inferiores a 10 Hz, apresenta o valor de 3mm/s para as fundações e 8mm/s para os pisos superiores. A norma em vigor na Suíça define um limite de 3 mm/s para a velocidade de vibração das partículas. No entanto, de acordo com a bibliografia do artigo, alguns autores ainda consideram o valor de 1 mm/s como limite para edifícios históricos. Este último foi o limite adotado como referência para os dados obtidos das estações. Assim, consoante a análise dos valores verificou-se que velocidade vertical das partículas no centro dos pisos era excedido.

2.6. CONCLUSÕES

Ao longo de todo este capítulo foram analisados vários critérios normativos referentes a vibrações induzidas tanto nos seres humanos como nos edifícios. Contudo nos capítulos seguintes deste documento, irá ser avaliado um edifício histórico com elevada importância patrimonial – Capela das Almas – pelo que das normas que foram abordadas, apenas algumas poderão efetivamente ser utilizadas neste caso de estudo. Na panóplia das normas estudadas apenas algumas estabelecem limites para edifícios históricos sujeitos particularmente a vibrações induzidas pelo tráfego. A norma suíça faz referência a edifícios sensíveis e que merecem proteção (categoria IV) impondo valores limite de 3 mm/s a 5 mm/s para vibrações induzidas pelo tráfego (Studer e Suesstrunk,1981). Quanto à norma alemã DIN 4150-3 (1999) inclui uma categoria relativa a edifícios históricos (III), em que sugere, conforme a frequência da vibração, velocidades entre 3 mm/s e 10 mm/s para medições efetuadas na base da fundação e 8 mm/s para medições realizadas nos pisos mais elevados. Relativamente à segunda parte da norma britânica BS 7385 (1993), esta não sugere valores limite para edifícios históricos. A norma apenas sugere valores para limitação de danos estéticos para estruturas reforçadas e não reforçadas. Outra das normas que não aborda diretamente edifícios antigos é a norma francesa, que faz apenas referência a edifícios sensíveis (Ministério do Ambiente) e estruturas com baixa qualidade mecânica (AFTES). A AFTES sugere uma velocidade das partículas entre 2,5 mm/s e 7,5 mm/s e o Ministério indica um intervalo de 4 a 9 mm/s. Relativamente aos Estados Unidas da América foram encontradas normas relativas a danos em edifícios causados por vibrações. Contudo a Autoridade Federal do Trânsito (FTA) sugere alguns valores limite para diferentes classes de estruturas, na qual os edifícios suscetíveis a danos são indicados com um limite de 3 mm/s. No estado da Califórnia são indicados valores para estruturas históricas com elevada sensibilidade entre 2 e 3 mm/s, consoante a propagação da vibração é do tipo contínua, intermitente ou transitória. Por último, na norma australiana (AS 2183) é sugerido para edifícios históricos uma velocidade de 2 mm/s.

Relativamente à norma portuguesa NP 2074 (2015), esta recomenda um limite de velocidade de vibração para as partículas entre 1,5 mm/s a 6 mm/s para edifícios sensíveis, consoante a frequência dominante. Assim, perante as normas internacionais analisadas no documento, a norma em vigor em Portugal é o documento normativo que indica o valor limite de velocidade de vibração das partículas mais restritivo.

3

DESCRIÇÃO DA CAPELA DAS ALMAS E RESUMO DOS TRABALHOS REALIZADOS DE 1982 a 2012

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo começa-se por fazer um enquadramento histórico da Capela das Almas assim como toda a descrição arquitetónica e estrutural da mesma. Numa segunda parte é descrita a cronologia de todas as monitorizações e intervenções da capela a que se teve acesso até à data (1982 a 2012). Contudo, para além dos trabalhos registados nestas datas verificou-se que a capela foi alvo de intervenções anteriores que não foram registadas e por isso não foi possível ter acesso a esses trabalhos.

Com vista a facilitar a leitura deste capítulo, na tabela 16 é apresentada uma síntese dos documentos utilizados como base para a escrita do capítulo.

Tabela 16 - Síntese dos documentos utilizados neste capítulo

Documento	Ano	Entidade
"Relatório dos trabalhos de conservação e restauro do património azulejar- *Capela de Santa Catarina das Almas*"	2001	Restauro Con'Arte
" Monitorização da Capela Santa Catarina ou Capela das Almas – *Descrição dos instrumentos a colocar* "	2002	Transmetro
"Estudo patrimonial de pormenor da frente de obra da estação. Capela das Almas - *edifício 0515*"	2002	Arqueologia e património
"Monitorização da Capela das Almas"	2005	Arqueologia e património
"Relatório intervenção de conservação e restauro da Capela das Almas"	2005	Arqueologia e património
"Monitorização automatizada em obras geotécnicas. Monitorização em tempo real da estação do Bolhão e da rede de metro ligeiro do Porto"	2006	Tecnasol FGE – Fundações e Geotecnia
Documento sem título	2007	Arqueologia e património
"Relatório Inspeção e reabilitação da Capela das Almas"	2012	Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)
"Relatório de inspeção e diagnóstico da Capela das Almas"	2013	Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia do Porto (IC-FEUP)

3.2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO E CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÓNICA DA CAPELA DAS ALMAS

No século XVII, na zona entre Fradelos e a Porta de Cimo de Vila (atual Praça da Batalha) situava-se uma quinta na qual existia uma capela de devoção a Catarina de Alexandria. Esta capela, possivelmente, está na base da construção da Capela das Almas que, na época atual se encontra no cruzamento entre a Rua de Santa Catarina e a Rua Fernandes Tomás (Figura 5). Em tempos, a Rua de Santa Catarina foi a junção de dois troços constituídos pela Rua Nova de Santa Catarina e pela Rua Bela Princesa que efetuava o prolongamento até à Praça do Marquês de Pombal (em tempos, Largo da Aguardente). Em relação à Rua Fernandes Tomás, esta apenas teve esta designação em 1835, em tributo a um notável "participante da Revolução Liberal de 1820". Outrora adotou a designação de Travessia de Santa Catarina, Rua do Bolhão e Rua da Igreja de Santa Catarina (Barros *et al.*, 2002).

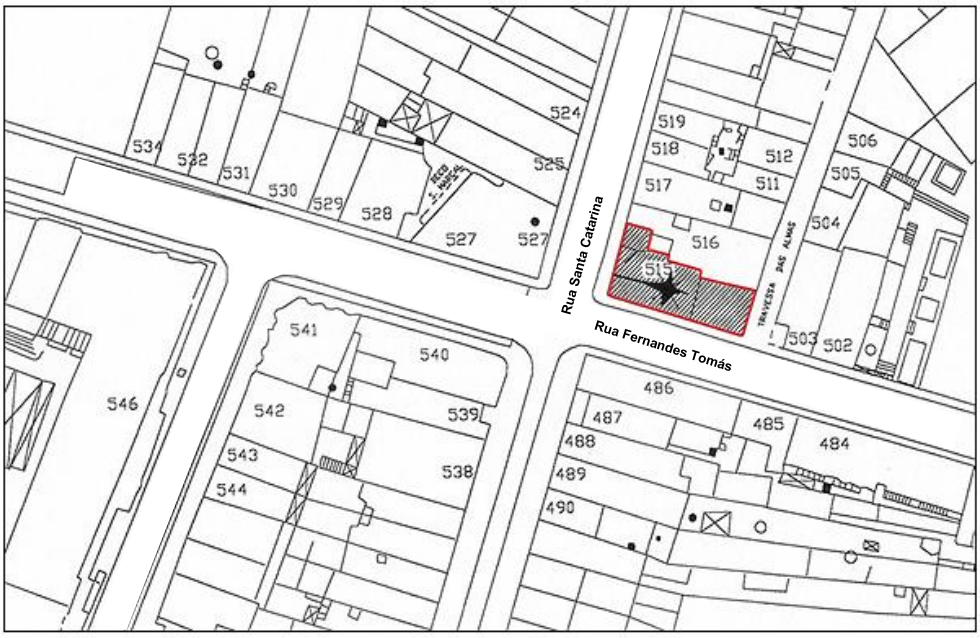


Figura 5 - Esquema da localização da Capela das Almas (Barros *et al.,* 2002)

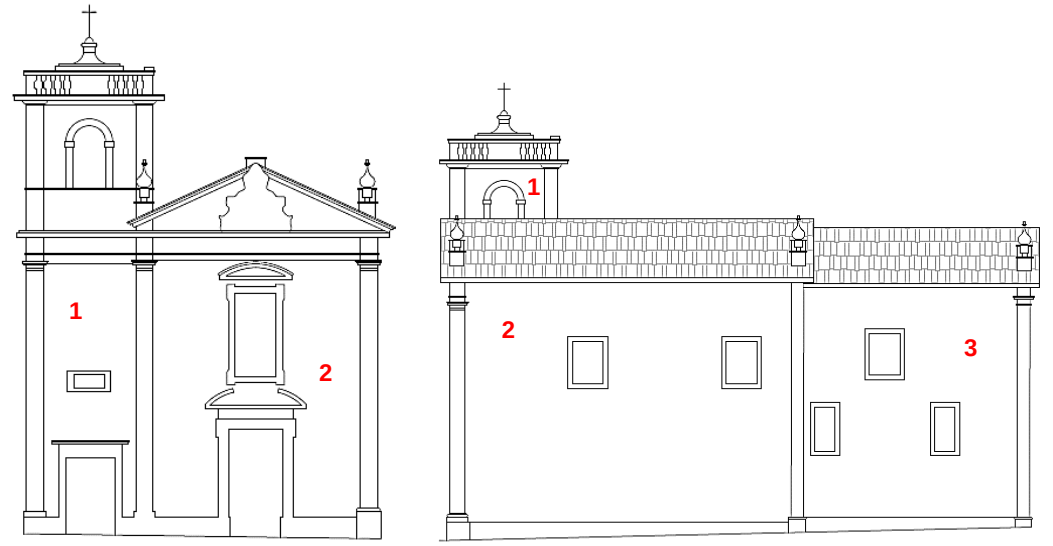
Em 1789, data do documento mais antigo relativo à Capela das Almas, ocorre o estabelecimento da Irmandade na capela iniciando assim a prestação do serviço religioso. Este serviço originou uma elevada atração de fiéis obrigando por isso à execução de melhoramentos na capela.

Nas novas reformas, em 1929, procedeu-se ao revestimento da fachada principal, torre, fachada lateral sul e interior com cerca de 16 mil azulejos da autoria do pintor Eduardo Leite, executados pela Fábrica de Cerâmica Viúva Lamego. No frontispício principal é apresentado um conjunto de quatro painéis ilustrados em temas relativos às Almas e Chagas de São Francisco, Eucaristia, Estigmatização de São Francisco e ao Coração de Santa Catarina. Na fachada lateral sul da nave, as iconografias representam a Vitória de Santa Catarina anunciada por um anjo, São Francisco D'Assis, a Discussão e Martírio de Santa Catarina e o Ato Milagroso de uma Fonte. Na capela-mor os painéis azulejares são todos alusivos ao ciclo de vida de São Francisco: Chagas, Entrada de São Francisco no Céu, Morte de São Francisco e São Francisco Levado pelos Anjos. Relativamente à torre sineira, os azulejos não possuem iconografia religiosa (Barros *et al.*, 2002).

A Capela das Almas é um edifício religioso de linhas simples constituído por uma nave única, por uma capela-mor ligeiramente mais baixa que a nave e por uma torre sineira adossada à esquerda da nave (Figura 6).

Na fachada principal, orientada para a Rua de Santa Catarina, situa-se o portal da capela finalizado superiormente por um frontão circular quebrado. Sobre este, e no mesmo alinhamento, existe um janelão, novamente rematado por frontão circular na zona superior, na qual é ostentado um vitral que retrata o "Dogma Redenção dos Homens pelo Sangue de Cristo" da autoria de Amândio Silva. No tímpano, fica localizado um brasão em granito, dedicado "às armas da Irmandade das Almas e das Chagas de São Francisco e ao Martírio de Santa Catarina" (www.patrimoniocultural.gov.pt).

À esquerda, ergue-se a torre sineira, onde a frente é ocupada por uma porta de acesso à capela da Nossa Senhora da Hora e à sacristia. O topo é preenchido por quatro janelas sineiras, uma balaustrada de granito com ornamentos nos cantos do mesmo material e uma cúpula finalizada com uma cruz de ferro.



1-Torre Sineira 2- Nave 3- Capela-Mor



(a) (b)

Figura 6 - Alçados do conjunto arquitetónico da Capela das Almas: (a) Fachada Principal (b) Alçado Lateral direito (Desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco – Capela das Almas)

No interior da capela, ao nível do rés-do-chão, é possível contemplar vários altares de estilo neoclássico. Na nave existem três do lado direito, alusivos a Nossa Senhora de Fátima, Sagrado Coração de Jesus e a Nossa Senhora das Dores, e outros dois do lado esquerdo dedicados a Nossa Senhora da Conceição e a S. João. Ao fundo da capela, no altar-mor, é retratada a Ascensão do Senhor num painel produzido pelas mãos do pintor Joaquim Rafael em 1815. Estes dois corpos – nave e capela-mor – são separados arquitetonicamente por um arco-cruzeiro sendo que os painéis azulejares de autoria do pintor Eduardo Leite encontrados no interior, apenas se localizam nas paredes da nave e no subcoro da mesma, sendo dedicados às Chagas e Alma de São Francisco e a Santa Catarina. Relativamente ao corpo adossado à nave, ainda neste piso, situa-se a capela da Nossa Senhora da Hora, local onde são efetuadas orações particulares por parte dos fiéis, assim como é permitido o acesso à sacristia. A partir desta última, devido a mudanças estruturais, é efetuado o acesso à cripta que, em tempos, era efetuado diretamente a partir da capela-mor. A cripta, a partir de metade do século XX, deixou de funcionar como cemitério para a Irmandade e passou a ser usada como arrumos. Tanto as paredes da sacristia como da capela de orações lateral, em 1953, foram revestidos por azulejos decorativos a pedido do Padre Alexandrino Brochado (Barros *et al*., 2002). Na figura 7 é apesentada uma planta geral e um corte transversal da Capela das Almas.

O primeiro piso do conjunto arquitetónico é preenchido por um escritório, situado no alinhamento da sacristia, por arrumos, pela escadaria de acesso às janelas sineiras e pelo Coro-Alto, sendo ainda possível o acesso ao edifício anexo à torre. No segundo e terceiro piso, apenas com entrada a partir desse edifício anexo, localizam-se quartos, salas, uma lavandaria e um pequeno terraço. No que diz respeito à cripta, esta apresenta uma altura de cerca de 2 m e uma área de implantação desde o arco-cruzeiro até ao retábulo-mor e toda a área da sacristia (Figura 8).

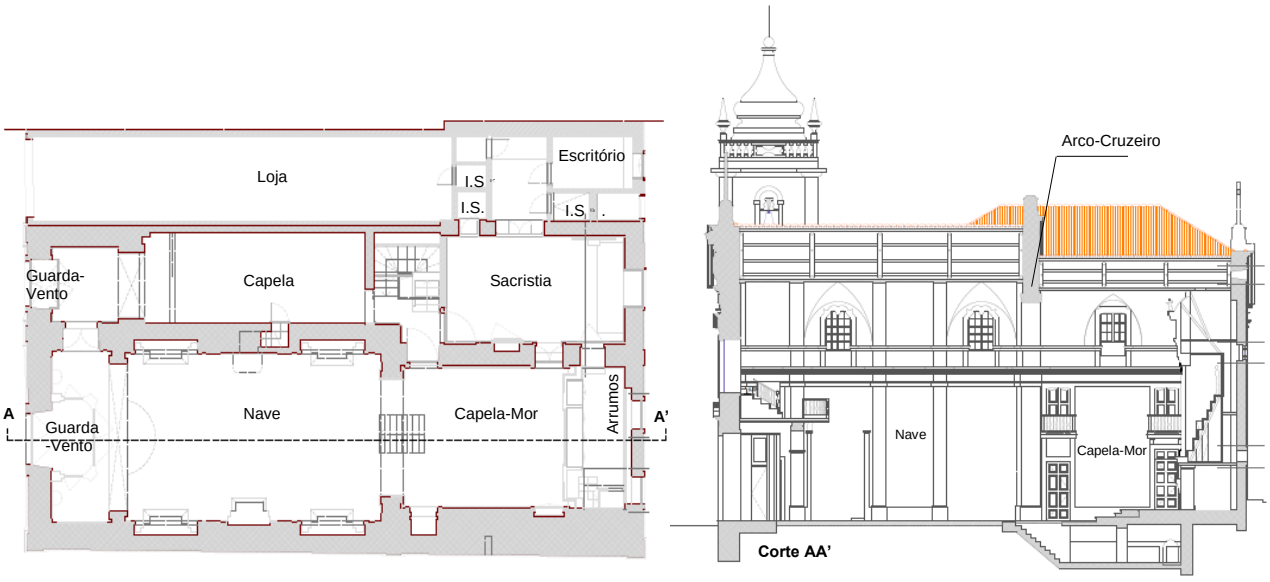


Figura 7 - Planta geral da Capela das Almas e respetivo corte transversal AA´ (Desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco – Capela das Almas)

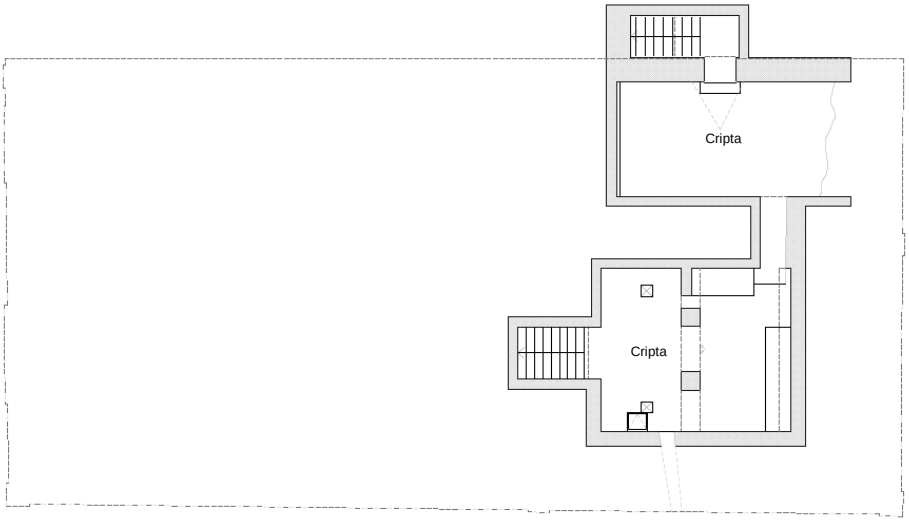


Figura 8 - Planta da cripta (Desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco – Capela das Almas)

Estruturalmente, a Capela das Almas é executada por paredes de alvenaria/cantaria de granito cuja espessura varia entre 1m (parede de fachada) e 1,40 m (paredes laterais). O teto é executado por abóbada de berço em tijolo maciço. O arco-cruzeiro, que divide a nave da capela-mor, é executado em granito. Na capela-mor existe um corredor embutido na parede ao nível da abertura das janelas com uma altura correspondente à altura das mesmas. Relativamente à estrutura da cobertura, esta é constituída por asnas de madeira sendo que, devido à diferença de cota, as asnas da cobertura da nave são de tipologia diferente das asnas da capela-mor.

Como já referido, de acordo com Del Grosso e Basso (2014) a geração de ondas é influenciada pelas condições superficiais das estradas, pelas características do veículo, pelas condições do solo, pelas características dinâmicas e estado de conservação do próprio edifício. Assim, tendo por objetivo avaliar o estado geral da estrutura portante da capela e detetar pontos frágeis a nível estrutural que, de alguma forma, pudessem estar relacionadas ou até mesmo contribuir para o destacamento dos azulejos, foi feita uma inspeção visual geral à estrutura da capela que se abordará no capítulo seguinte. Importa, no entanto, salientar que na inspeção efetuada observou-se a existência de um reforço estrutural no arco-cruzeiro, e sobre a qual não foi possível obter informações da data da sua execução e da causa dos danos. A observação do reforço leva a crer na existência de uma descompressão do arco-cruzeiro (confirmada depois na inspeção no desvão da cobertura) e cuja causa não se conhece. Admite-se, no entanto, que obras no arruamento da R. Fernandes Tomás com escavações possam ser responsáveis pela descompressão, o que poderá ter originado alguns empenos na parede lateral direita da capela que confina com esta rua. Refere-se que na rua Fernandes Tomás, junto à esquina da parede lateral direita da capela com a parede fundeira existem diversas caixas de infraestruturas (águas pluviais, saneamento,...).

3.3. MONITORIZAÇÕES E INTERVENÇÕES REALIZADAS NA CAPELA DAS ALMAS

3.3.1. TRABALHOS REALIZADOS ANTES DA CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRO DO BOLHÃO

Até à data do início dos trabalhos de construção da estação de metro do Bolhão, a Capela da Almas já tinha sido sujeita, desde a colocação dos azulejos em 1929, a duas intervenções relativamente aos painéis que revestem toda a fachada principal e lateral direita da mesma e que originaram a classificação da

capela como imóvel de interesse público em 1993. A primeira intervenção na Capela teve início em setembro de 1982 e perdurou até dezembro do mesmo ano. Segundo o relatório elaborado por Barros *et al*. (2002), Alexandrino Brochado em *"Capela das Almas – Uma jóia da azulejaria portuguesa, 1985*" cita que nesta intervenção, para além de terem sido removidos 2400 azulejos que se encontravam em risco iminente de queda, sendo à posteriori novamente colocados, foram também reproduzidos 28 azulejos na mesma fábrica dos azulejos iniciais - Fábrica de Cerâmica Viúva Lamego.

Em 2000, é realizada uma segunda intervenção de restauro do revestimento azulejar requerida pela Direção-Geral de Edifícios e Monumentos Nacionais (DGEMN) e levada a cabo pela empresa Restauro Con'Arte. De acordo com o relatório realizado pela empresa, no âmbito da intervenção foram novamente reassentados cerca de 600 azulejos, dos quais 260 foram fabricados de novo. Para além disso, foram realizadas dessalinizações, aplicados fungicidas, assim como foi efetuada a fixação dos vidrados e reconstituição cromática dos azulejos originais (Roque da Silva, 2001).

Uma vez que, com a construção da linha do metro do Porto do Bolhão, que liga a estação da Trindade à estação do Dragão, junto à Capela das Almas, foram necessários alguns trabalhos preliminares para a proteção do património azulejar da capela.

Neste sentido, e uma vez que não foi possível analisar o registo cartográfico dos trabalhos efetuados nesta última intervenção, antes do início dos trabalhos referentes à construção da estação do metro, foi necessário efetuar a monitorização e mapeamento dos painéis azulejares. Este processo de mapeamento e monitorização foi dividido em diversas etapas. Na primeira etapa, a 5 de setembro de 2002 (levantamento de referência), foi efetuada uma verificação relativa à aderência das argamassas de suporte, através de percussão, em que os azulejos foram individualmente assinalados por "oco" e "não oco" sobre fotografias parcelares. Estas fotografias, posteriormente, serviram de base para a criação de uma matriz onde aos eixos (cada fiada de azulejos) verticais correspondiam letras e aos horizontais uma numeração crescente, estabelecendo uma localização exata para cada azulejo que eventualmente tivesse de ser removido.

Adicionalmente, foram anotadas em fichas individuais outras patologias, como destacamento/fraturação de algumas unidades de azulejos e existência de fissuras estruturais. Ainda nesta fase de levantamento de referência - antes da passagem da tuneladora - foi efetuado, como medida preventiva, o faceamento total dos painéis com tela de gaze aplicada no centro de cada azulejo, com vista a reduzir o risco de queda dos mesmo durante o processo de escavações.

3.2.2. TRABALHOS REALIZADOS AO LONGO DA CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DE METRO DO BOLHÃO

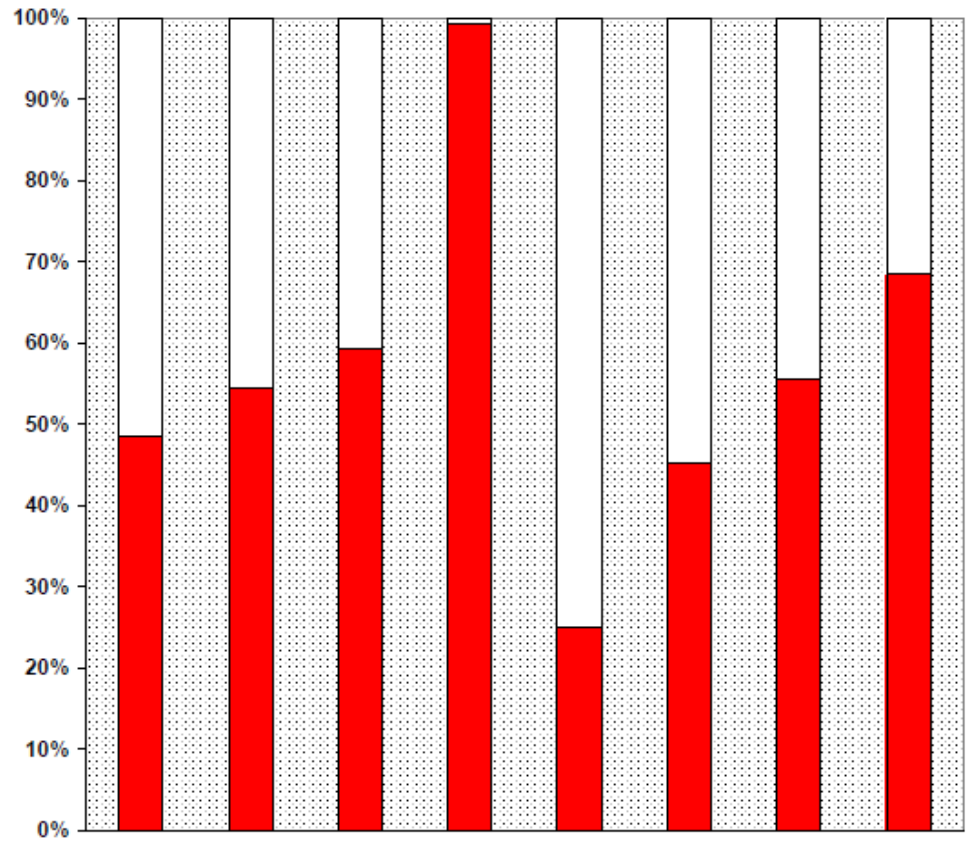
Ao longo da execução da obra (março 2003 a setembro de 2003) foi realizado em vários momentos, principalmente em fases de obra de maior impacto, o levantamento dos danos dos painéis. Em abril de 2003, verificou-se que os critérios de avaliação "oco" e "não oco" não eram suficientes, pelo que as patologias dos azulejos foram mais detalhadas fazendo a distinção, principalmente, entre azulejo parcialmente destacado, azulejo destacado e a existência de fissuras. Na tabela 17 estão sequenciadas as datas das intervenções efetuadas na capela durante o desenvolvimento da construção da estação subterrânea e observa-se que a capela-mor esteve exposta a um maior número de levantamento de danos uma vez que, de acordo com os dados do levantamento de referência, apresentava elevadas deficiências na aderência entre o azulejo e a argamassa de suporte (Hipólito e Torres, 2005a). No anexo A.1 apresentam-se ilustrações do mapeamento dos azulejos desses levantamentos tabelados.

Tabela 17 - Síntese dos levantamentos realizados na Capela das Almas entre setembro de 2002 e abril de 2005 (Hipólito e Torres, 2005a)

CAPELA-MOR		
Levantamentos	Data	Contexto de Obra
1º Levantamento – Levantamento de Referência	Setembro de 2002	Antes da passagem da tuneladora
2º Levantamento – Levantamento Parcial	Novembro 2002	Após passagem da tuneladora
3º Levantamento	Março de 2003	Abertura do poço
4º Levantamento- Levantamento Parcial	Março de 2003	Abertura do poço
5º Levantamento	Abril de 2003	Abertura do poço
6º Levantamento	Abril de 2003	Abertura do poço
7º Levantamento	Abril de 2003	Abertura do poço
8º Levantamento	Agosto de 2003	Trabalhos no cruzamento de Santa Catarina
9º Levantamento	Setembro de 2003	Trabalhos no cruzamento de Santa Catarina
10º Levantamento	Dezembro de 2004	Inicio da Intervenção de Conservação e Restauro
NAVE		
Levantamentos	Data	Contexto de Obra
1º Levantamento – Levantamento de Referência	Setembro de 2002	Antes da passagem da tuneladora
2º Levantamento – Levantamento Parcial	Novembro 2002	Após passagem da tuneladora
3º Levantamento	Abril de 2003	Abertura do poço
4º Levantamento	Julho de 2003	Trabalhos no cruzamento de Santa Catarina
5º Levantamento	Dezembro de 2004	Inicio da Intervenção de Conservação e Restauro
FACHADA		
Levantamentos	Data	Contexto de Obra
1º Levantamento – Levantamento de Referência	Setembro de 2002	Antes da passagem da tuneladora
2º Levantamento – Levantamento Parcial	Novembro 2002	Após passagem da tuneladora
3º Levantamento	Julho de 2003	Trabalhos no cruzamento de Santa Catarina
4º Levantamento	Setembro de 2004	Inicio da Intervenção de Conservação e Restauro
INTERIOR DA CAPELA		
Levantamentos	Data	Contexto de Obra
1º Levantamento – Levantamento de Referência	Setembro de 2002	Antes da passagem da tuneladora
2º Levantamento	Agosto de 2003	Trabalhos no cruzamento de Santa Catarina
3º Levantamento	Dezembro de 2004	Inicio da Intervenção de Conservação e Restauro

Com base na monitorização e no mapeamento dos azulejos, toda a informação relativa às patologias de diferentes fases da obra foi analisada detalhadamente e convertida em gráficos para uma análise mais clara e imediata.

No gráfico da figura 9, resultante da análise dos resultados dos gráficos apresentados no anexo A.2, estão representadas as percentagens dos painéis azulejares com e sem patologia das várias zonas constituintes da Capela das Almas. Pela análise dos resultados obtidos em cada levantamento de danos efetuado, a entidade que efetuou os mesmos concluiu que a execução da obra estava relacionada com a evolução de danos nos azulejos, sendo que a Capela-Mor foi desde início a que apresentou uma maior preocupação visto que a taxa de agravamento foi de cerca de 40% (Hipólito e Torres, 2005a). Ainda assim, os autores do mesmo relatório de monitorização, reconhecem que não é possível concluir de forma objetiva se o agravamento das patologias observadas esteja diretamente relacionado com os trabalhos das obras ou se apenas houve uma evolução típica perante os danos já existentes.



	Fachada		Capela-Mor		Nave		Interior Capela	
	1º Lev.	4º Lev.	1º Lev.	10º Lev.	1º Lev.	5º Lev.	1º Lev.	3º Lev.
Az. com Patologias	48,46%	54,37%	59,22%	99,41%	25,04%	45,16%	55,65%	68,46%
Az. sem Patologias	51,54%	45,63%	40,78%	0,59%	74,96%	54,84%	44,35%	31,54%
% Taxa de Agravamento	5,91%		40,19%		20,12%		12,81%	

Figura 9 - Evolução das patologias entre o primeiro e o último levantamento (Hipólito e Torres, 2005a)

Para além da monitorização dos painéis azulejares, foi necessário monitorizar todo o processo de escavação da caverna principal, galerias e poços (Gaspar, 2002). Como se pode observar pelas figuras 10 e 11, a estação tem uma disposição em forma de cruz onde se distende a caverna principal. Nos extremos, localizam-se os poços de acesso: a nascente, o poço das Camélias de formato circular e a poente, o poço Alexandre Braga. A abertura destes poços foi o ponto de partida para a construção da estação, sendo antes efetuada a passagem da tuneladora. Na figura 12 está apresentado um esquema em 3D da estação subterrânea do metro do Bolhão.

Segundo o relatório de monitorização realizado pelos geólogos envolvidos na obra (Santos *et al*., 2006), todo este processo foi acompanhado por um plano de monitorização automatizado constituído por: uma monitorização geológica-geotécnica composta por extensómetros e inclinómetros com o intuito de medir deformações no maciço; por uma monitorização topográfica através de prismas óticos para medir "deformações plano-altimétricas e rotacionais" nos edifícios e por uma monitorização estrutural para controlar as vibrações e a abertura de fissuras através de acelerómetros, sismógrafos e fissurómetros. Ao todo, o sistema de monitorização da estação é constituído pelos seguintes instrumentos:

- 2 estações totais TCA 2003 robotizadas e 101 mini-prismas óticos
- 1 acelerómetro triaxial e 1 sismógrafo triaxial
- 16 extensómetros duplos, num total de 32 transdutores elétricos de deformação
- 3 cadeias de inclinómetros *in-place,* sendo uma das cadeias biaxial, num total de 44 sensores eletrolíticos
- 5 piezómetros elétricos
- 4 fissurómetros elétricos

Para além destes instrumentos também foram instalados nas fachadas da capela, como demonstra a figura 13, seis réguas de nivelamento de 30 cm, três alvos óticos com dimensão 5x5 cm^2 e um clinómetro com uma base de suporte 20x20 cm^2.

Todo este processo de monitorização permitiu ajustar e reavaliar os métodos utilizados durante a fase de escavação e ter em conta os limites definidos durante a fase de projeto. Os valores limites estabelecidos para a Capela das Almas estão apresentados na tabela 18.

Tabela 18 - Critérios de atenção e alarme para a Capela das Almas (Santos *et al*., 2006)

	Atenção	**Alarme**
Assentamento	≥ 20 mm	≥ 32 mm
Rotação das fachadas *	> 1/500	> 1/300
Deslocamento Horizontal **	> 9 mm	> 15 mm

* medida nos prismas do nível superior
** medido nos prismas do nível

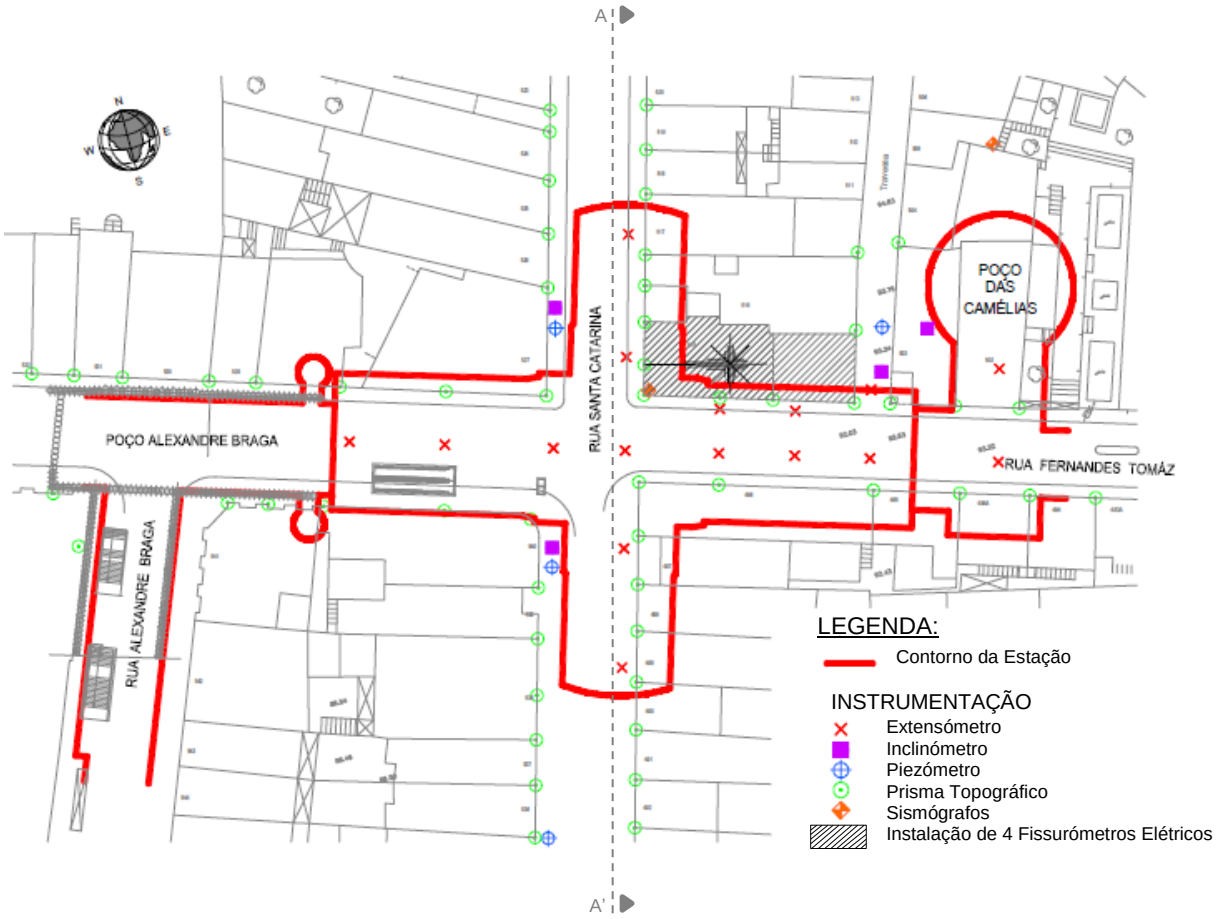


Figura 10 - Esquema da localização da Capela das Almas e secções de instrumentação (Santos *et al.,* 2006)

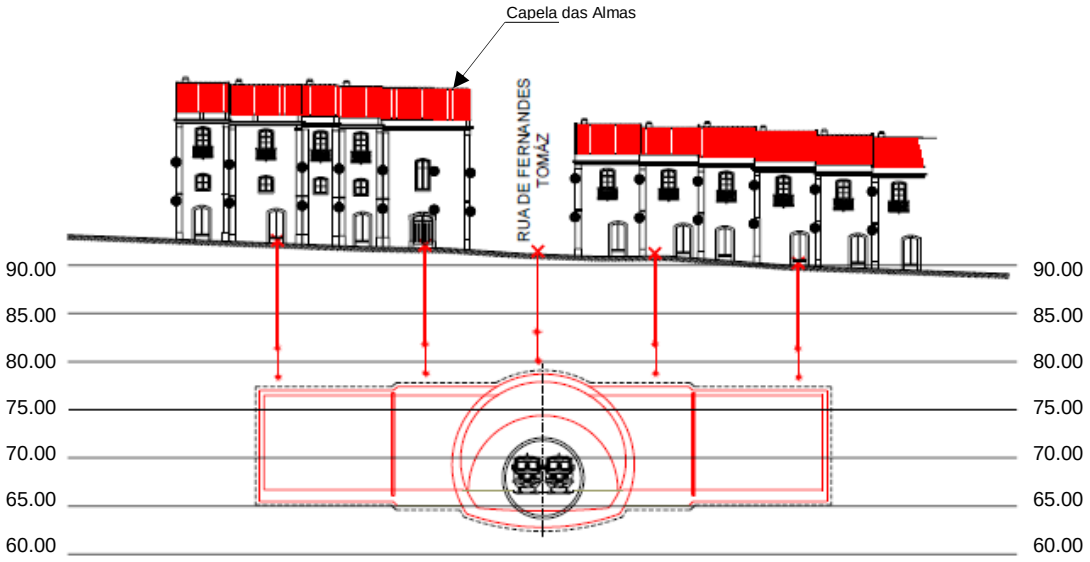


Figura 11 - Secção transversal da monitorização (Corte AA') (Santos *et al*., 2006)

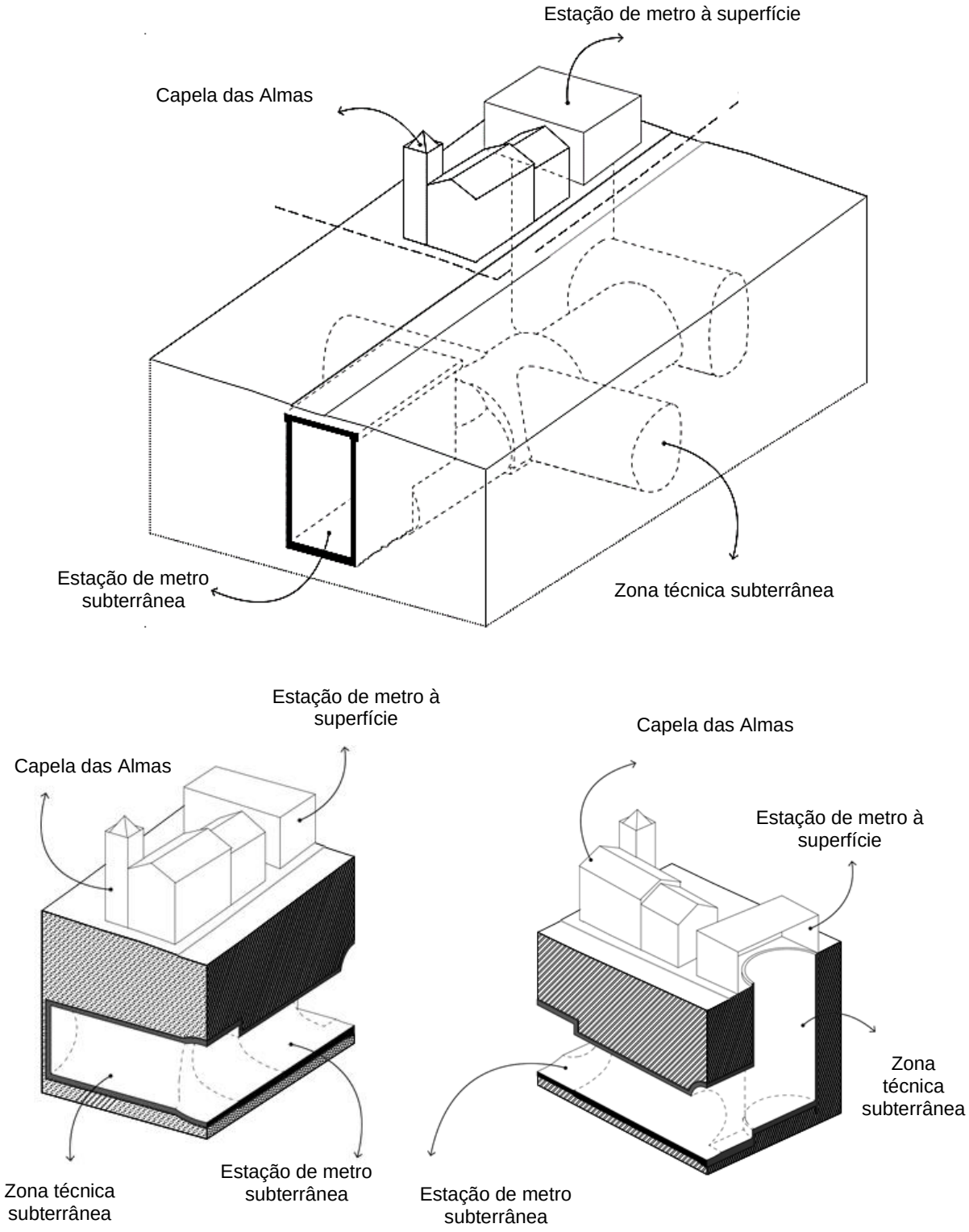


Figura 12 - Esquemas em 3D da estação de metro do Bolhão (Desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco – Capela das Almas)

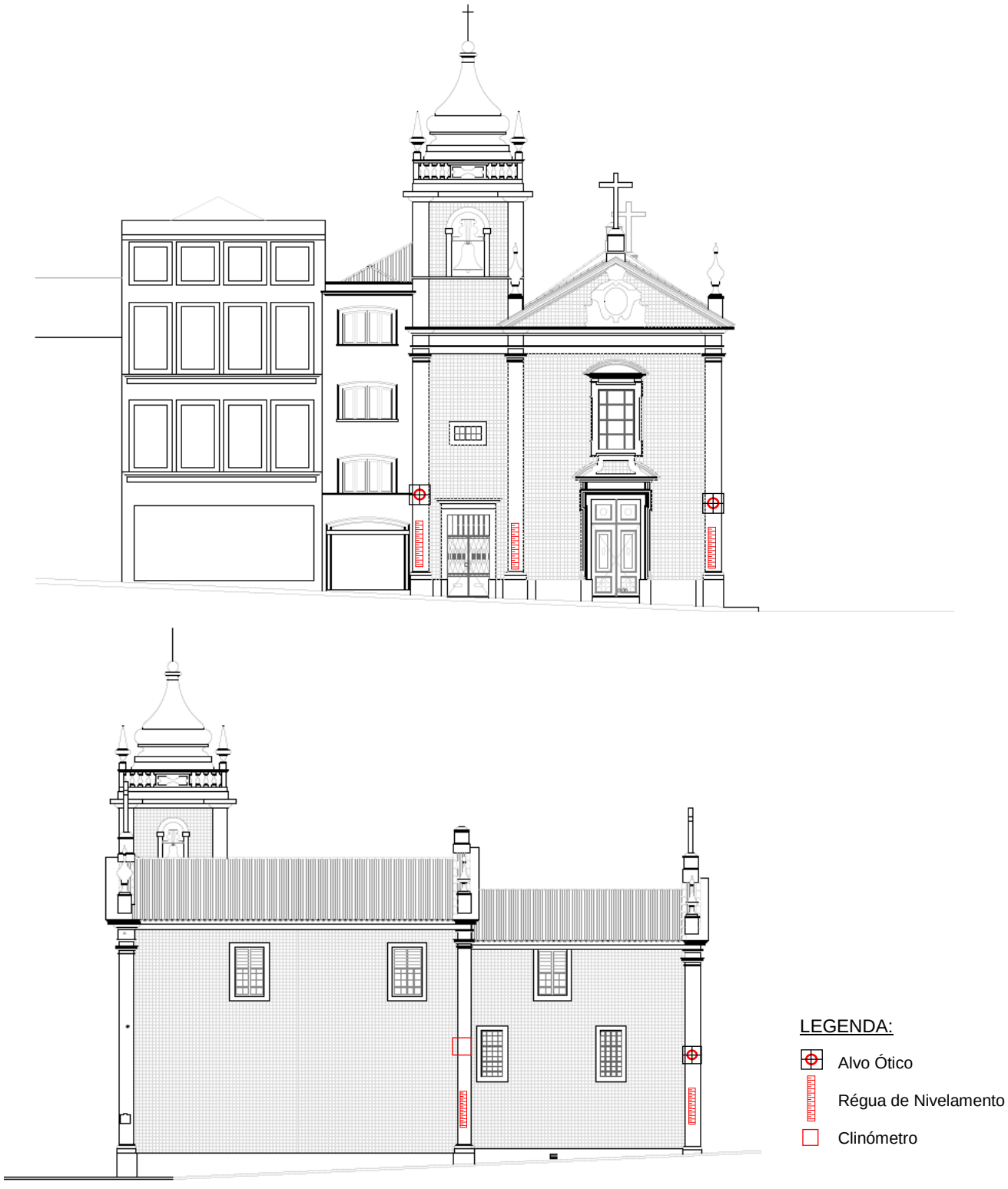


Figura 13 - Esquema com localização da instrumentação na capela, adaptado dos desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco (Capela das Almas)

Após a conclusão dos levantamentos efetuados aos painéis azulejares da Capela das Almas ficou evidente que seria indispensável uma intervenção de modo a restaurar e conservar os azulejos anteriormente sinalizados com patologias.

Desta forma, de 3 de dezembro de 2004 a 28 de janeiro do ano seguinte, teve início uma intervenção nos azulejos da fachada principal e da torre sineira que, apesar de não serem as fachadas com maior preocupação em termos de estado de conservação, eram as fachadas em que a pressão para a remoção dos andaimes era maior devido aos eventos religiosos. De 31 de janeiro a 15 de abril de 2005, a frente de tratamento passou para a Nave e Capela-Mor e de 4 a 8 abril as intervenções tiveram lugar no interior da capela (Hipólito e Torres, 2005b).

É necessário realçar que no âmbito de projetos de conservação e restauro de património cerâmico deve ser respeitado um conjunto de requisitos e princípios com vista a preservar os materiais das paredes antigas, nomeadamente, na argamassa de substituição. Em ações de reparação de edifícios antigos as argamassas para além de terem que garantir compatibilidade com os elementos já existentes, deverão apresentar um compromisso entre resistência e durabilidade, assegurando o princípio da reversibilidade, para que no caso da haver necessidade de substituição ser possível efetuar sem danificar o conjunto. As argamassas de cal aérea hidratada devido ao "lento endurecimento, boa deformabilidade e baixo módulo de elasticidade permitem acomodar variações higrométricas ambientais e pequenas tensões no suporte sem fissurar", são as mais indicadas para reabilitações de edifícios antigos. No entanto, em casos em que a presença de humidade no suporte é continuada ou ainda em situações em que o roubo do azulejo possa suceder (piso térreo) é possível a utilização de cal hidráulica natural. Neste tipo de intervenções as argamassas não devem ser muito fortes (p.e. cimento Portland) uma vez que dificultam a remoção do azulejo sem que ocorra danos e a presença de sais neste tipo de argamassas provoca destacamento do vidrado do azulejo (Velosa *et al*., 2012).

Quando a espessura do paramento e a face do tardoz é superior a 2 cm, e após um tratamento prévio do suporte que inclui limpeza, regularização, humedecimento, colocação de mestras e marcação de juntas, deve-se aplicar uma camada de argamassa de nivelamento. No decorrer de um tempo de 24h após aplicação e regularização da camada de argamassa de nivelamento pode ser efetuada a aplicação da argamassa de assentamento para receber o azulejo. Existem duas formas de aplicar argamassa de assentamento: camada única no tardoz do azulejo ou camada dupla com uma aplicação na parede e no tardoz do azulejo. Este último tipo de aplicação poderá apresentar uma melhor aderência do azulejo ao suporte. Após a colocação do azulejo, este deve ser percutido com um martelo de borracha de forma a que ocorra um assentamento adequado (Velosa *et al*., 2012).

Na intervenção indicada anteriormente (dezembro de 2004 a abril de 2005) foram utilizadas argamassas de nivelamento e de assentamento de cal aérea hidratada, em que a relação de componentes usados se apresenta na tabela 19. Para além da relação das componentes das argamassas está apresentada a relação de componentes da calda consolidante que foi utilizada na consolidação *in situ* dos azulejos que não foram removidos (Hipólito e Torres, 2005b).

Tabela 19 - Relação dos componentes utilizados na argamassa de nivelamento e de assentamento (Hipólito e Torres, 2005b)

ARGAMASSA DE NIVELAMENTO		**ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO**		**CALDA CONSOLIDANTE**	
Quantidade	**Componente**	**Quantidade**	**Componente**	**Quantidade**	**Componente**
1 P/V	Cal em Pasta	2 P/V	Cal em Pasta	1 P/V	Cal consolidante
1 P/V	Cal I 40 ®	1 P/V	Cal I 40 ®	1 P/V	Cal I 40 ®
1 P/V	Meia areia	3 P/V	Areia fina	2 P/V	Ca CO_3 (precipitado)
3 P/V	Areia fina	3 P/V	Areia SP 49	1 P/V	Sílica em pó (P_4)
$\frac{1}{10}$ P/V	Óxido de zinco (biocida)	1 P/V	Ca CO_3 (pó de calcário)	$\frac{1}{10}$ P/V	Óxido de zinco (biocida)
	Plextol B 500 ®	$\frac{1}{10}$ P/V	Óxido de zinco (biocida)		Plextol B 500 ®
	Água desionizada		Plextol B 500 ®		Água desionizada
			Água desionizada		

P - Peso V - Volume

Nas áreas intervencionadas, a metodologia dos trabalhos envolve sempre a mesma sucessão de procedimentos, tendo como base os dados obtidos nos levantamentos de danos durante a fase de monitorização. Na tabela 20 é feita a transcrição dessas etapas, assim como a referência dos registos fotográficos tirados ao longo desses tratamentos apresentados no anexo C.1. Além disso, no anexo A.3 estão ainda apresentadas as ilustrações em CAD dos azulejos que foram submetidos aos procedimentos de conservação e restauro.

Tabela 20 - Etapas dos procedimentos de conservação e restauro realizados na Capela das Almas - adaptado do relatório de intervenção da Capela das Almas (Hipólito e Torres, 2005b)

Tratamento	**Descrição**	**Registo fotográficos**
Operação S.O. S.	Pré-fixação e consolidação dos vidrados em destacamento com uma solução *Paraloid*® B72 a 20% em acetona e xileno	1
Proteção de Emergência	Colocação de uma tela de gaze sobre os azulejos com uma solução *Paraloid*® B72 em acetona a 30%	2
Remoção da tela de gaze	Removeu-se a tela de gaze com recurso a bisturis e prospetores dentários (via mecânica) e com água desionizada, *Teepol*® ou acetona (via química). Nalguns azulejos foi mantida a gaze uma vez que os azulejos exibiam risco de queda.	3
Limpeza de juntas e de fissuras	Após a limpeza da superfície dos azulejos, efetuou-se a limpeza das juntas e fissuras através de bisturis e de um mini disco diamantado. Posteriormente recorreu-se à utilização de uma pistola de ar comprimido de baixa pressão para finalizar a limpeza.	4
Fechamento de juntas e de fissuras	Com um pincel, executou-se a aplicação longitudinal de argamassa de fechamento das fissuras e juntas. Após a secagem desta, os excessos foram removidos com sisal	5, 6
Consolidação *in situ* do suporte	Previamente à consolidação, foram realizadas várias perfurações nas juntas entre os azulejos em zonas em que as argamassas não tinham aderência. Após este processo, introduziu-se uma calda consolidante através de injeção.	7, 8
Limpeza dos azulejos	Depois da consolidação procedeu-se novamente a uma limpeza dos azulejos utilizando os mesmos materiais aquando da remoção da gaze.	
Desinfestação	Com vista a eliminar a alguma microflora presente em alguns azulejos foi aplicado um biocida com pincel.	

Tabela 20 (continuação) - Etapas dos procedimentos de conservação e restauro realizados na Capela das Almas adaptado do relatório de intervenção da Capela das Almas (Hipólito e Torres, 2005b)

Tratamento	**Descrição**	**Registo fotográficos**
Preenchimento volumétrico de lacunas	Esta etapa teve como objetivo preencher descontinuidades presentes na superfície do material cerâmico do azulejo.	9
Levantamento dos azulejos	O levantamento foi efetuado em azulejos em que o risco de queda era iminente recorrendo a um equipamento elétrico de alta rotação. Após esse levantamento foram colocados nessas áreas de remoção uns contrafortes de gaze de modo a proteger essa zona. Mais tarde foi retirada a argamassa de suporte com recurso a um martelo e um escopro. No interior alguns azulejos apresentavam também uma argamassa de suporte com muito má aderência, eventualmente devido aos elevados teores de humidade existentes dentro da Capela.	10, 11, 12
Tratamento dos azulejos em estaleiro	Em estaleiro, utilizando escovas de aço inox e nylon, foram retiradas as argamassas que ficaram presas no azulejo. Após esta fase foram efetuadas colagens de azulejos fragmentados e preenchidas lacunas no material cerâmico do mesmo.	13, 14, 15
Reassentamento das unidades	Simultaneamente aos trabalhos efetuados em estaleiro, foi humedecido o suporte de assentamento para posterior colocação da argamassa de nivelamento. Uma vez ganha a presa desta argamassa, os azulejos foram humedecidos e foi colocada no tardoz do mesmo a argamassa de assentamento.	16, 17, 18, 19, 20
Fechamento definitivo das juntas	Após finalizado o reassentamento, foi aplicada a argamassa de fechamento nas juntas.	21
Remoção dos excessos de argamassa, reintegração cromática a frio e limpezas finais	Depois de seca a argamassa de fechamento, e removidos os excessos da mesma com recurso a sisal ou gaze, foi realizada uma reintegração cromática. Nesta utilizaram tintas e vernizes com uma elevada resistência às radiações ultravioletas. Por fim, retiraram as proteções das cantarias, desmontaram os andaimes e efetuaram-se as limpezas finais.	22, 23, 24

3.2.3. TRABALHOS REALIZADOS APÓS A CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DE METRO DO BOLHÃO

Anos mais tarde, em 2007, foi realizado, novamente pela empresa "Arquitetura e Património", uma intervenção urgente em 36 azulejos exteriores da Capela-Mor. Os azulejos localizados junto ao lambril (Figura 14), foram submetidos a um faceamento com tela de gaze, visto que algumas dessas unidades se encontravam totalmente destacadas da argamassa de suporte.

Uma vez que este grupo de azulejos foi sujeito a intervenções de conservação e restauro em abril de 2005, nomeadamente consolidação do suporte através de injeções com caldas consolidantes, este reaparecimento de azulejos destacados e com falta de vidrado levantou preocupação e conduziu à realização do presente trabalho. Contudo, este estudo apenas abordará a relação dos destacamento dos azulejos por vibrações e não a questão da perda de vidrado.

Perante a informação presente no relatório do estudo, os azulejos que se encontravam nas proximidades não continham os danos observadas nas 36 unidades em análise, tendo por isso sido considerado que o destacamento provinha eventualmente de ações humanas e das vibrações provocadas pelo acentuado tráfego de veículos pesados (Fonseca, 2007).

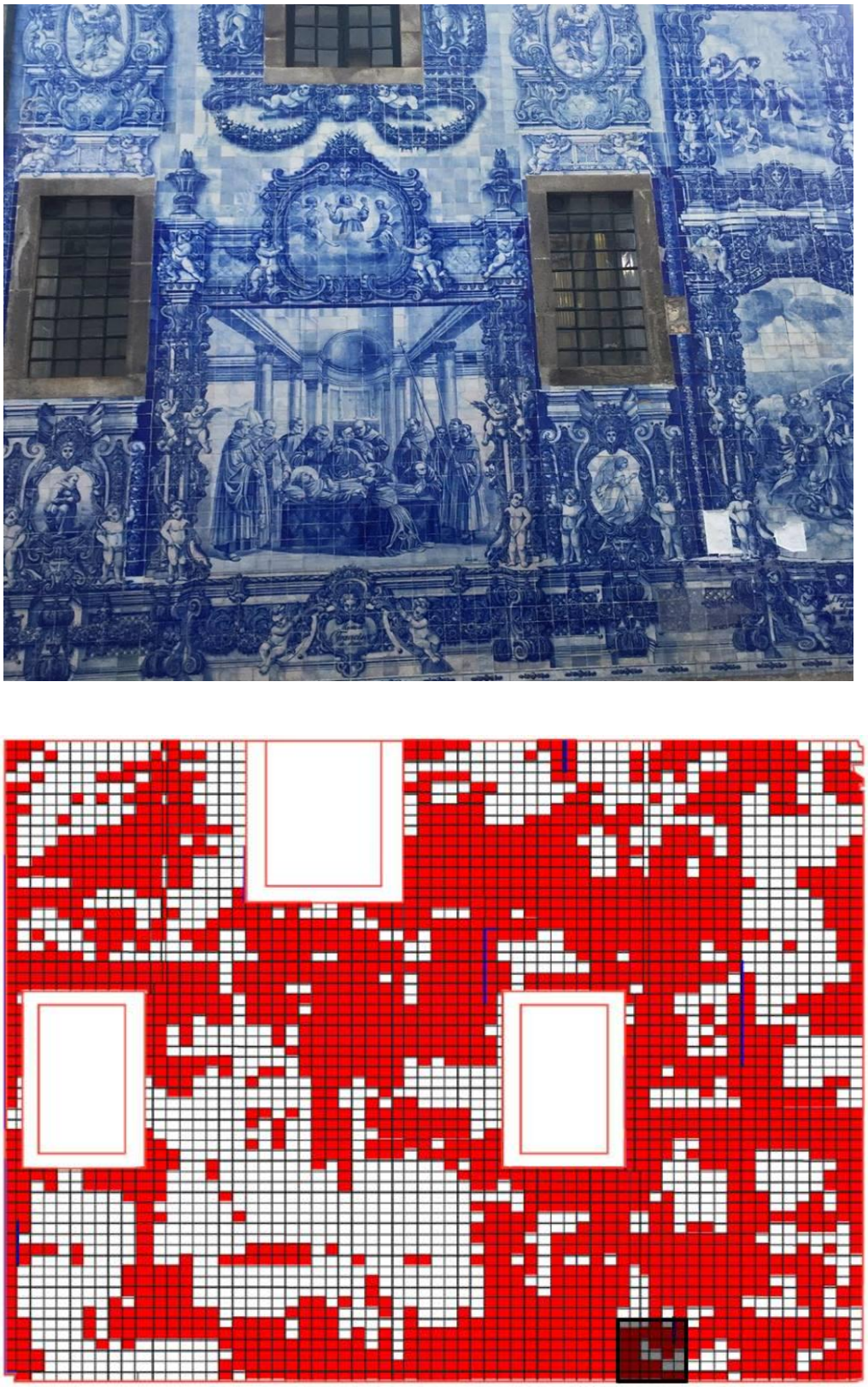


Figura 14 - Esquema da localização das 36 unidades de azulejos da Capela-Mor submetidas a intervenção em 2007 (Fonseca, 2007)

3.2.4. INSPEÇÃO DE ÂMBITO ESTRUTURAL

Em 2012, o Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (IC-FEUP) efetuou uma inspeção para analisar as patologias estruturais existentes, focando as paredes de alvenaria e a cobertura da nave da capela. A inspeção ao desvão da capela-mor não foi efetuada, dado não existirem condições de segurança para avaliar as ligações estruturais das paredes, uma vez que esse procedimento tem de ser feito pelo perímetro exterior e com retirada de telhas.

Para além da avaliação do estado de conservação das estruturas, esta inspeção visava verificar se existia algum dano estrutural, como desconfinamento das paredes ao nível da cobertura, ou evidências construtivas tal como deficiente embricamento entre panos de parede ou deficiente embricamento entre paredes perpendiculares que contribuíssem para o destacamento dos azulejos.

Neste estudo, no que diz respeito às paredes de alvenaria de granito, verificou-se a presença de fissuras bastante significativas em certas zonas do interior da capela junto ao coro-alto que indicam o destacamento da parede lateral direita para o exterior, corroborando com a descompressão do arco-cruzeiro, podendo, estas fissuras terem acontecido em diferentes tempos. Algumas das fissuras mais significativas possuem fissurómetros que foram colocados aquando da monitorização da escavação da estação do Bolhão, não se conhecendo contudo as conclusões desta monitorização. As fissuras com maior relevância localizavam-se no interior da capela, nomeadamente na parede de alvenaria de pedra no cruzamento da fachada principal com o alçado lateral direito, e na parede de alvenaria de pedra no desvão da cobertura sobre o arco-cruzeiro, na transição da nave para a capela-mor. Para além destas, foram também observadas, no decorrer da monitorização, fissuras no teto.

Em relação à cobertura da nave, esta é constituída por "cinco asnas de madeira, na qual se encontram apoiadas quatro madres, a cumeeira, as varas, as ripas e as telhas" (Costa *et al*., 2013). As asnas são semelhantes entre si em termos de dimensões, à exceção da asna 5 que não apresenta pendurais (Figura 15). Foram efetuados ensaios não destrutivos com recurso ao Resistograph® nas asnas, madres e cumeeira, com o objetivo de avaliar a degradação da madeira. Este aparelho mede a resistência da mesma à perfuração de uma agulha inserida a uma velocidade constante, relacionando-a com a energia necessária para esse processo. As perfurações, devido ao pequeno diâmetro da agulha (na ordem dos 2 mm), são praticamente impercetíveis, sendo que os locais onde foram realizadas estas inspeções apresentam-se assinalados na figura 16.

Observando um dos gráficos (Figura 17) obtidos do Resistograph®- os restantes estão disponíveis no anexo B - o IC-FEUP subdividiu os valores da escala, consoante estados de conservação:

- Estado intacto – para valores superiores a 80 representados pela cor verde
- Estado intermédio – para valores entre 60 e 80 a amarelo
- Estado degradado – para valores inferiores a 60 indicados a vermelho

Após análise dos dados, devido ao acentuado estado de degradação de algumas partes de madeira, o IC-FEUP aconselhou o reforço e substituição de algumas peças de madeira, sendo necessária a substituição da maioria das madres dado que apresentavam degradação, particularmente nas extremidades por apodrecimento. Segundo esta entidade, relativamente ao reforço de peças, este passaria pela colocação de elementos de madeira nova ou, eventualmente, chapas metálicas (Silva *et al.*, 2012), em cada face da peça a reforçar, fixas através de parafusos. Quanto à substituição das peças, é necessário ter em atenção às características das peças originais, sendo proposta a utilização de "madeira de classe D30, caso sejam folhosas, ou C24, no caso de resinosas", bem como o tratamento da madeira com produtos indicados para a prevenção de patologias por agentes bióticos.

Por outro lado, durante a inspeção observou-se a existência de três escoras situadas entre as asnas 4 e 5. Supõem-se que duas das escoras, suportadas pelas linhas das asnas 4 e 5, foram colocadas para diminuir o vão da madre 3, contudo, provocam esforços adicionais nas asnas. A terceira escora, com ligação direta à fachada lateral direita, supõe-se ter sido colocada devido à degradação da madre 3 junto à asna 4. No entanto, esta escora tem como efeito "empurrar" a parede para fora do seu plano (Figura 18 e 19). Foi sugerida a remoção destas escoras uma vez que introduzem forças concentradas nos elementos em que se apoiam, podendo originar danos nos mesmos.

Ainda no relatório desta inspeção, para além das anomalias estruturais anteriormente abordadas, é mencionada a presença de humidades na parede interior do alçado lateral direito da capela, junto ao altar-mor. Para tal, foi indicada a necessidade de uma intervenção geral na cobertura que, para além dos reforços estruturais inclua a substituição das telhas e a revisão do sistema de drenagem das águas.

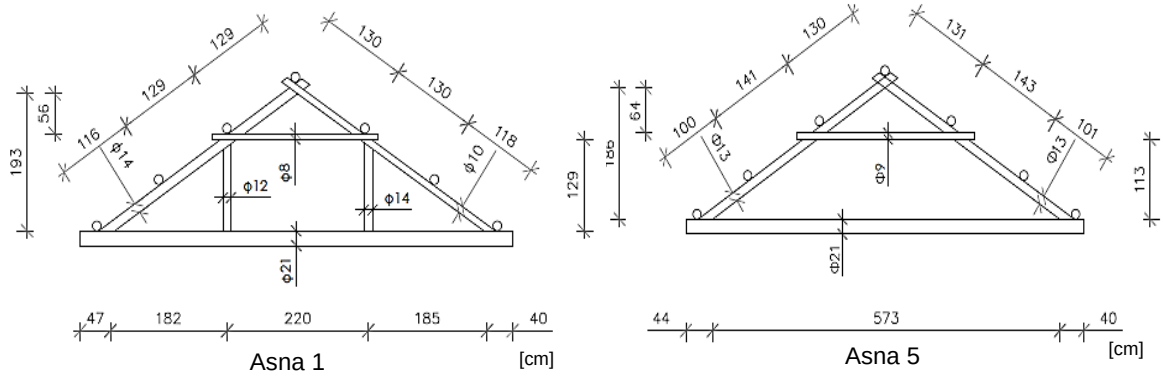


Figura 15 - Configuração estrutural da asna 1 e da asna 5 (Desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco - Capela das Almas)

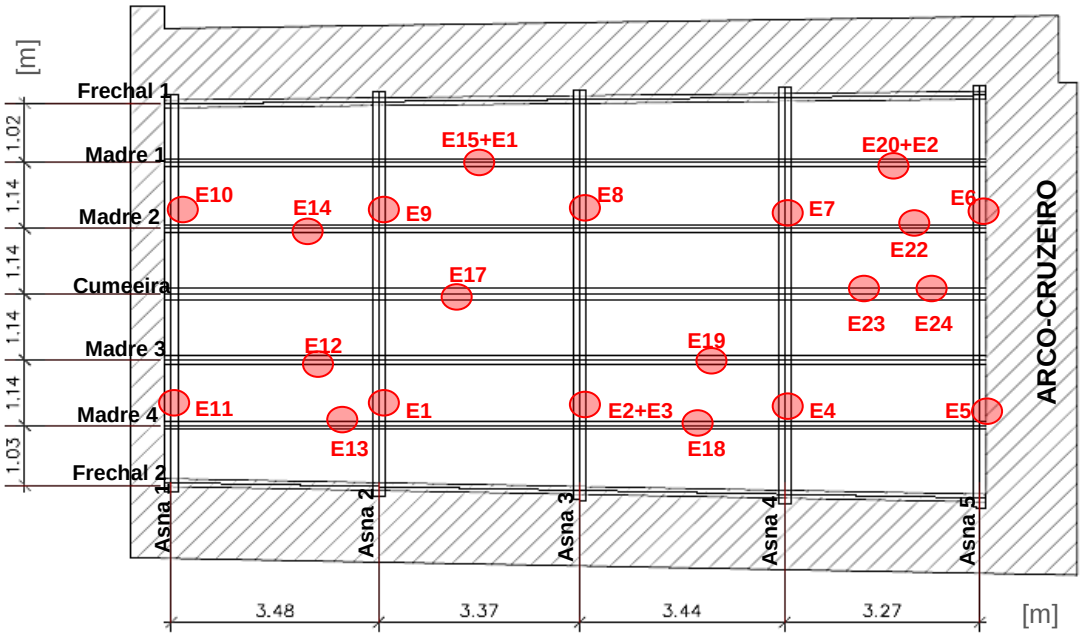


Figura 16 - Planta com localização das sondagens realizadas com o Resistograph® segundo o IC-FEUP (Costa *et al*., 2013)

CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E1

ELEMENTO: Linha da Asna A2 – Encontro Sul	**Valor Médio de Resistograph:** 116
ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Degradação superficial e no interior da viga.	
REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®	

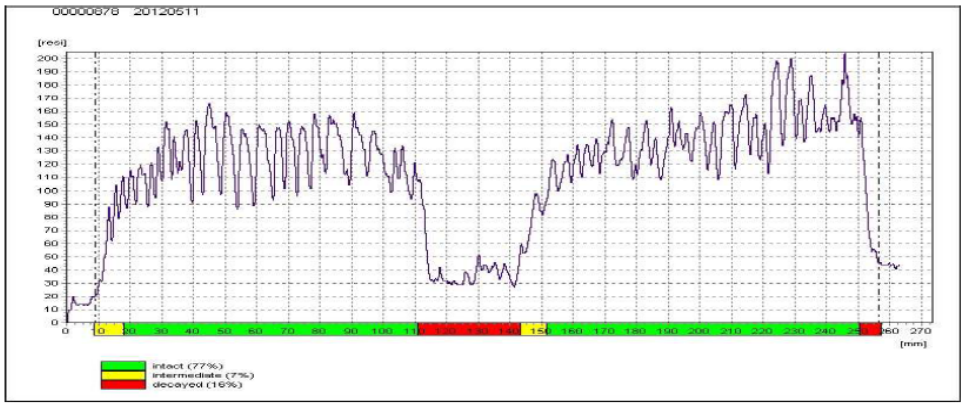


Figura 17 - Registo obtido com o Resistograph® na linha da asna 2 da cobertura (Costa *et al*., 2013)



Figura 18 - Escoras apoiadas na linha das asnas 4 e 5 (à esquerda) e escora que efetua ligação da asna 4 à parede lateral direita (à direita)



Figura 19 - Ligação da asna 4 com a madre 3 e escora que apoia na parede lateral direita

O mapa de danos que aqui é apresentado é o que consta no relatório do Instituto Superior de Engenharia do Porto (Silva *et al*., 2012) realizado como trabalho final da disciplina de projeto do 3º ano, com o apoio do Instituto da Construção.

MAPA DE DANOS

Tipo de dano: Fissuração na parede interior da fachada principal

Localização: Nave

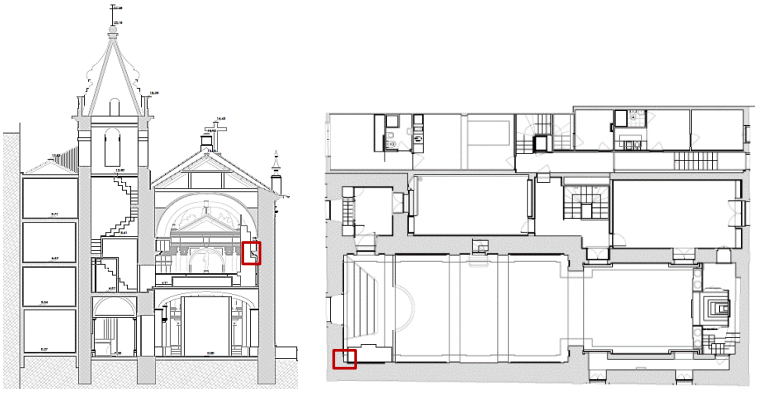


Figura 20 - Corte transversal e planta de localização do dano

Registo fotográfico



Figura 21 - Fissura na alvenaria de pedra

Descrição: Fissura visível na parede de alvenaria de pedra no cruzamento da fachada principal e o alçado lateral direito (Rua Fernandes Tomás). A fissura apenas se desenvolve junto à parte superior da parede, não apresentando grandes dimensões.

Tipo de dano: Humidade na parede interior da fachada lateral sul

Localização: Capela-Mor

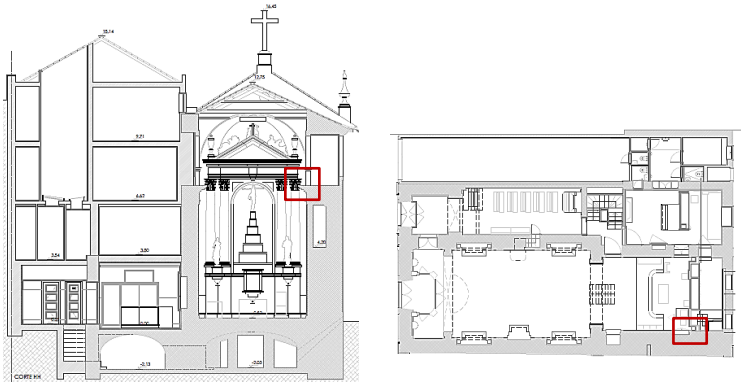


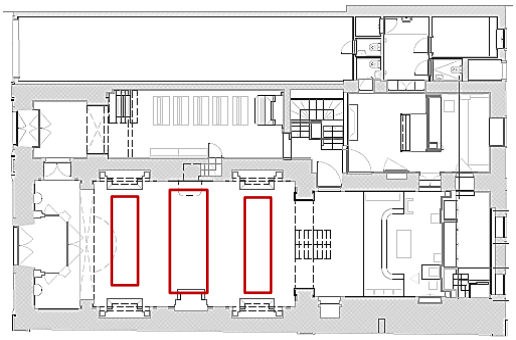
Figura 22 - Corte transversal e planta de localização do dano

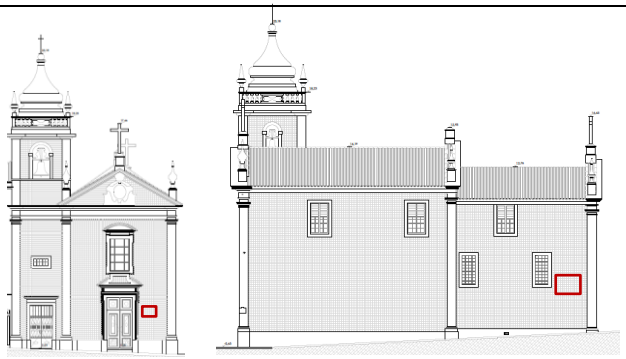
Registo fotográfico



Figura 23 - Humidade junto ao altar-mor

Descrição: Humidade visível perto da janela superior do capela-mor na parede interior do alçado lateral sul. Apresenta dimensões consideráveis.

Tipo de dano: Fissuração no teto da capela	
Localização: Nave	**Registo fotográfico**
 Figura 24 - Planta de localização do dano	 Figura 25 - Fissuração generalizada no teto da nave
Descrição: Fissuração generalizada no teto e ao longo dos arcos.	

Tipo de dano: Perda de aderência das argamassas de assentamento	
Localização: Fachadas exteriores da capela	**Registo fotográfico**
 Figura 26 - Alçados de localização do dano	 Figura 27 - Destacamento de azulejos com consolidação provisória com faceamento
Descrição: Destacamento de azulejos	

<table>
<tr><td colspan="2">Tipo de dano: Deformação da cobertura</td></tr>
<tr><td>Localização: Cobertura da nave</td><td>Registo fotográfico</td></tr>
<tr><td> 
Figura 28 - Planta de localização do dano</td><td> 
Figura 29 - Deformação da cobertura</td></tr>
<tr><td colspan="2">Descrição: Dano visível na parte superior da cobertura</td></tr>
</table>

3.4. NOTAS FINAIS

Após a análise da informação recolhida e após a visita técnica à Capela das Almas importa reter:

- Pelos registos existentes, antes da construção da estação de metro do Bolhão, os painéis azulejares das fachadas principal e lateral direita da capela só foram intervencionados em 1982 após a sua colocação.
- Foi feita uma campanha de inspeção ao estado destes painéis antes da execução da obra do metro do Bolhão, onde foram identificadas diversas patologias e onde foram tomadas medidas preventivas para evitar a sua queda, como o faceamento geral das fachadas.
- Aquando da construção da estação do metro do Bolhão, que se situa sob a capela, foi implementado um plano de instrumentação pela Metro do Porto na zona da estação e na própria capela. Não foi possível aceder aos relatórios de monitorização, pelo que não se sabe qual o nível de vibrações a que a estrutura na capela esteve sujeita aquando da construção do metro/estação, bem como que movimentos ocorreram na parede lateral (os que já existiam, os que surgiram de novo e os que foram agravados).
- Na conservação e restauro dos painéis azulejares foram usadas argamassas de cal aérea hidratada, não se conhecendo ainda a espessura da camada de assentamento dos azulejos. Nos azulejos que foram consolidados *in situ* foi usada uma calda consolidante.
- As inspeções estruturais feitas à capela registaram fissuração na parede sobre o arco-cruzeiro, deficiente embricamento da parede de fachada com a parede lateral direita no nível acima da abóbada, apodrecimento do frechal e degradação das madres. Não sendo possível aceder ao desvão da cobertura da capela-mor não se sabe o estado do frechal nem das avarias das asnas na parede. Do observado regista-se a descompressão do arco-cruzeiro por rotação/deformação/assentamento da parede lateral direita da nave e que se relaciona com as obras de escavação no arruamento. Refira-se que não existe qualquer registo do reforço do arco-cruzeiro.

- Verifica-se na rua Fernandes Tomás e junto à esquina da parede lateral direita com a parede fundeira várias caixas de infraestruturas. Estas caixas sugerem escavações próximas da fachada lateral direita para a passagem destas infraestruturas (águas, saneamento, cablagens elétricas/telefónicas,…).

4

AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DA CAPELA DAS ALMAS E DEFINIÇÃODO PLANO DE MONITORIZAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a inspeção realizada à Capela das Almas para analisar o seu estado de conservação, nomeadamente ao nível da cobertura. O capítulo apresenta ainda o plano de instrumentação que foi definido para monitorizar as vibrações em várias zonas da capela. A inspeção permitiu fazer um levantamento dos danos em várias zonas da capela e fazer a sua comparação com a descrição dos danos encontrados em inspeções anteriores. Além disso, permitiu ainda definir os locais mais adequados para instalar o sistema de monitorização de vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário e ferroviário (isto é, devido ao metro do Porto). O plano de monitorização das vibrações definido teve como principal objetivo analisar os níveis de vibração em vários elementos da capela, em particular nos azulejos da fachada lateral direita (virada para a rua Fernandes Tomás) de modo a avaliar se o seu recorrente destacamento poderia estra associado ao facto de estarem submetidas a níveis de vibração demasiado elevados. Assim, a velocidade de vibração atingida pelas partículas, devido à circulação rodoviária e ferroviária será objeto de comparação no capítulo seguinte com os limites impostos por algumas normas em vigor atualmente. A definição do plano de monitorização passou ainda pela análise prévia em teste em laboratório de dois tipos de acelerómetros com o intuito de perceber qual o mais adequado para o presente caso de estudo, bem como a melhor posição para colocação dos mesmos.

4.2. INSPEÇÃO E ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DOS DANOS NA CAPELA DAS ALMAS

No decorrer deste estudo foi efetuada uma inspeção à Capela das Almas, com o objetivo de inventariar os danos existentes para, à posteriori, serem comparados com danos registados em inspeções anteriores, de modo a que seja possível compreender se há ou não evolução. Numa avaliação geral, estruturalmente, a capela apresenta um estado de conservação adequado, no entanto, ao longo da inspeção foi possível observar que a cobertura da nave apresenta na sua maioria danos a nível estrutural, sendo umas das zonas mais necessitadas de intervenção urgente. Quanto à cobertura da capela-mor, devido à reduzida altura do desvão da mesma, não foi possível o acesso. Contudo, constatou-se que a estrutura da cobertura aparenta ser constituída por peças de madeira regulares em bom estado de conservação, o que pode levar a crer que esta zona da capela possa ter sido sujeita a uma eventual intervenção. Refira-se que as telhas da capela-mor apresentam um estado de conservação maior do que as da nave. Em contrapartida, relativamente a danos estéticos, a capela apresenta um estado de degradação bastante avançado, uma vez que os azulejos que revestem as fachadas têm, na suas maioria, fissuração generalizada no vidrado.

Além disso, os danos que causam maior preocupação na capela são o empolamento e o destacamento de alguns azulejos.

4.2.1. MAPA DE DANOS DA COBERTURA DA NAVE

O acesso à estrutura da cobertura da nave foi realizado pela sua parte superior através de uma das janelas da torre sineira, tendo sido necessário a remoção de algumas telhas para ter acesso a uma escada de madeira e assim poder entrar na cobertura e efetuar a inspeção. As tabelas seguintes apresentam os registos fotográficos das patologias identificadas durante a inspeção, bem como a descrição das mesmas.

Tabela 21 – Mapa de danos na cobertura – degradação das madres

MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da nave
Tipo de dano: Degradação das madres

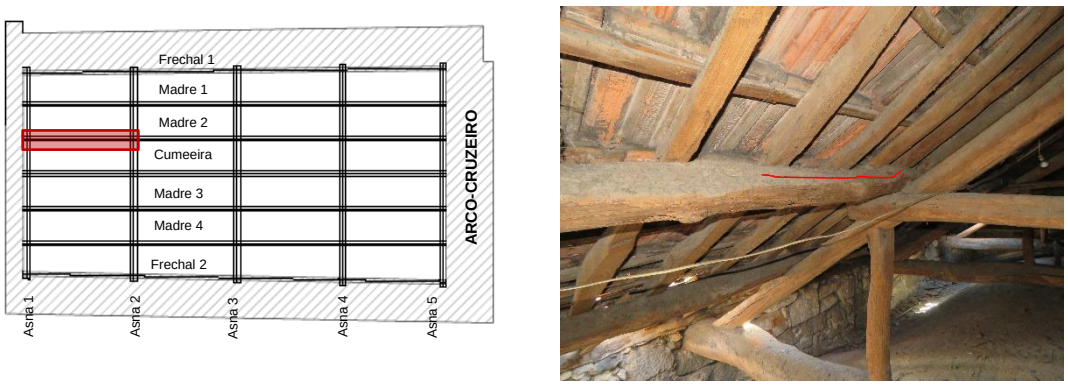


Figura 30 – Degradação da madre 2 entre a asna 1 e 2

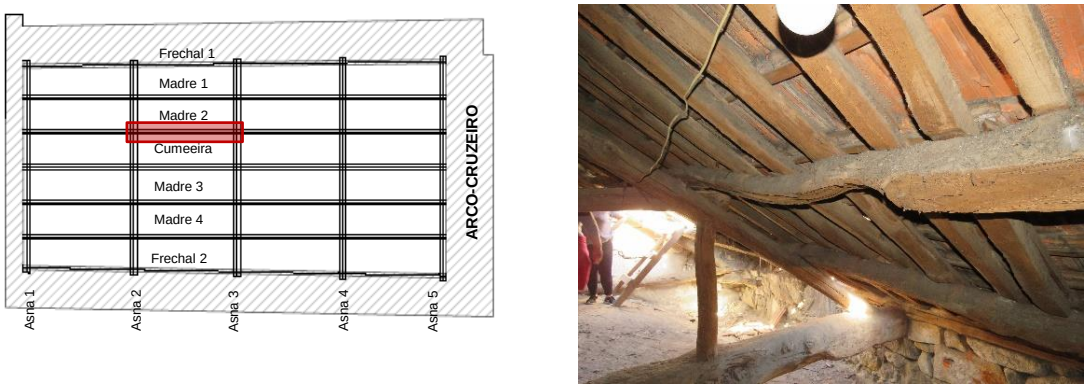


Figura 31 – Degradação da madre 2 entre a asna 2 e 3

Descrição: Na sua maioria, as madres apresentam elevado estado de degradação. No registo fotográfico da figura 30 é possível observar uma fenda de tração causada provavelmente pela deformação excessiva da cobertura. Na figura 31 é visível uma redução da seção transversal da madre.

Tabela 21 (continuação) - Mapa de danos na cobertura da nave - degradação das madres

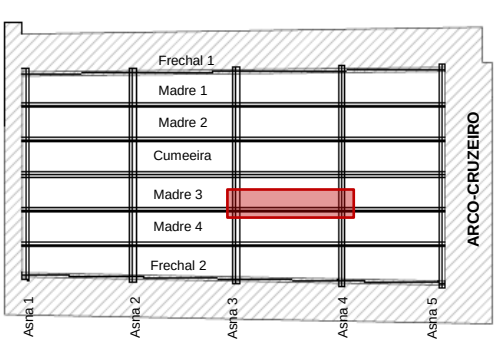
MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da nave
Tipo de dano: Degradação das madres
  Figura 32 – Degradação da madre 3 entre a asna 3 e 4
Descrição : Elevada degradação da madre 3.

Tabela 22 - Mapa de danos na cobertura da nave - degradação do contra ripado

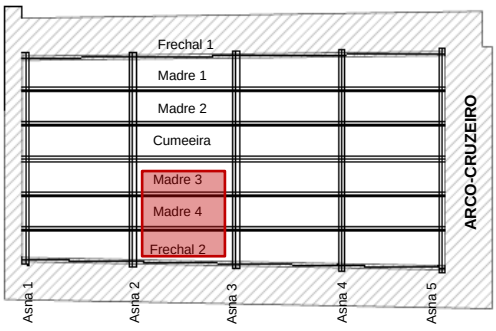
MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da nave
Tipo de dano: Degradação do contra-ripado
  Figura 33 – Degradação do contra ripado entre a asna 2 e 3 na direção da fachada lateral direita
Descrição : Degradação do contra-ripado na direção da fachada direita entre as asnas 2 e 3.

Tabela 23 - Mapa de danos na cobertura da nave – fraco embricamento na alvenaria

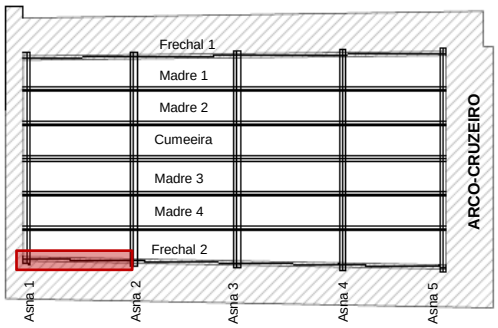
MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da nave
Tipo de dano: Alvenaria de pedra miúda e fraco embricamento
  Figura 34 - Alvenaria de pedra da fachada direita
Descrição: Na fachada direita (Figura 34) é possível observar que a alvenaria de pedra da parede que dá apoio ao frechal possui pedras de menores dimensões e mal aparelhada. Contrariamente, na fachada principal a alvenaria está bem aparelhada.

Tabela 24 - Mapa de danos na cobertura da nave – Humidade na linha da asna 1

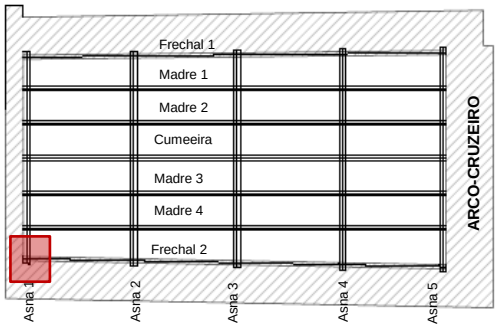
MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da nave
Tipo de dano: Humidade na linha da asna 1
  Figura 35 - Ligação do frechal com a linha da asna 1 (Fachada direita)
Descrição: Na figura 35 é visível a humidade na ligação do frechal com a linha da asna 1.

Tabela 25 - Mapa de danos na cobertura da nave – Degradação do frechal

MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da nave
Tipo de dano: Degradação do frechal

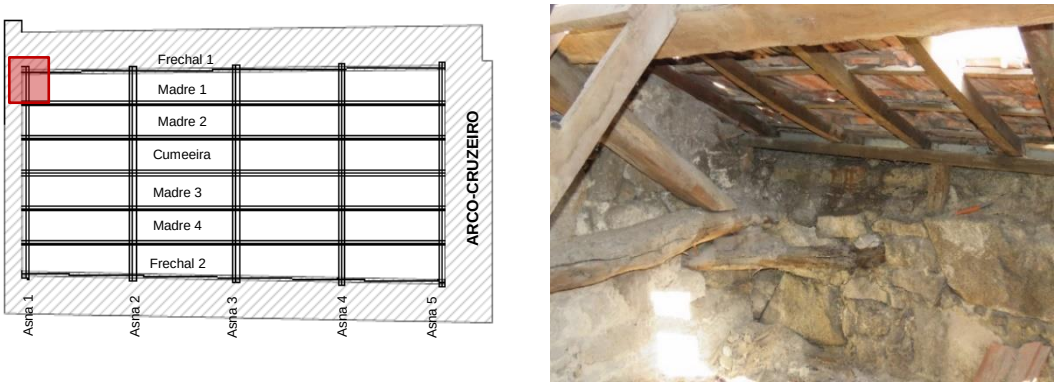


Figura 36 – Degradação da ligação do frechal com a asna 1 (Fachada esquerda)

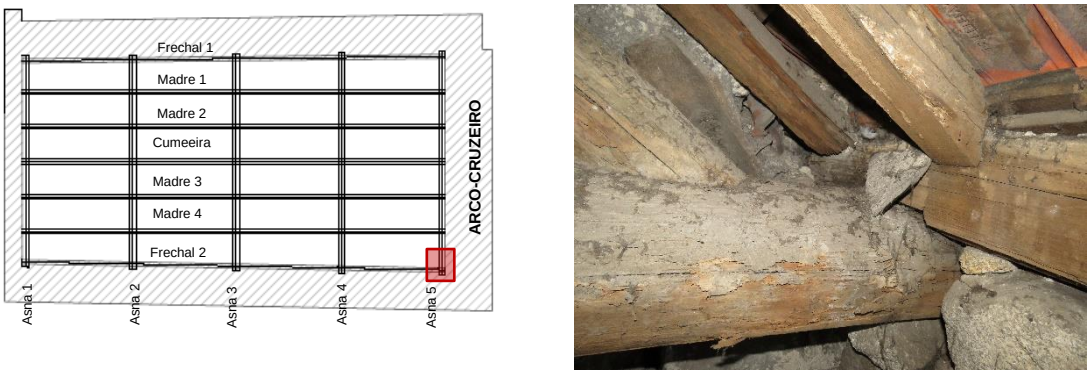


Figura 37 -Degradação da ligação do contra ripado ao frechal na transição do arco-cruzeiro para o alçado direito

Descrição: Na ligação da fachada principal com a fachada lateral esquerda, entre a asna 1 e asna 2, já não existe frechal, possivelmente resultado da degradação da madeira. Com vista a reparar a cota da cobertura foi colocada uma peça para sustentar o contra ripado. No entanto, devido à inexistência do frechal (elemento em que se apoia o contra ripado) foi colocado naquela zona uma peça de madeira que, além de ter dimensões insuficientes, não dá continuidade ao frechal existente pelo que o canto da parede não se encontra travado. Foi também colocada uma peça na diagonal, no canto do cruzamento das fachadas, na tentativa de travar as paredes, contudo apresenta um elevado grau de degradação (Figura 36). Observou-se ainda, que o contra ripado está bastante deformado entre estas duas asnas.

A ligação do contra ripado ao frechal na zona de transição do arco-cruzeiro para o alçado direito encontra-se muito degradada (Figura 37).

Tabela 26 - Mapa de danos na cobertura da nave – Introdução de esforços adicionais

MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da nave
Tipo de dano: Introdução de esforços adicionais provocados pela inserção de escoras e indevido funcionamento da asna 5

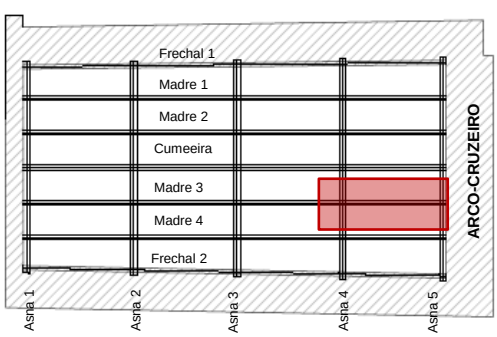




Figura 38 - Escoras apoiadas nas linhas das asnas 4 e 5

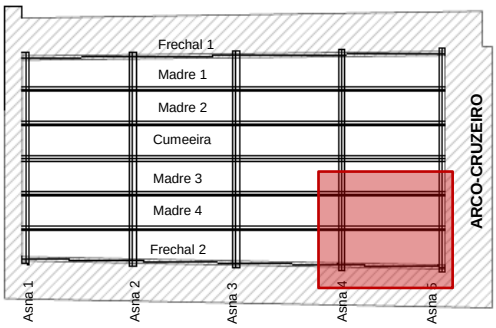
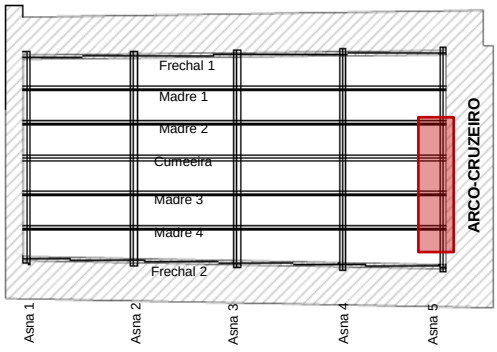




Figura 39 - Escora com ligação direta à fachada direita



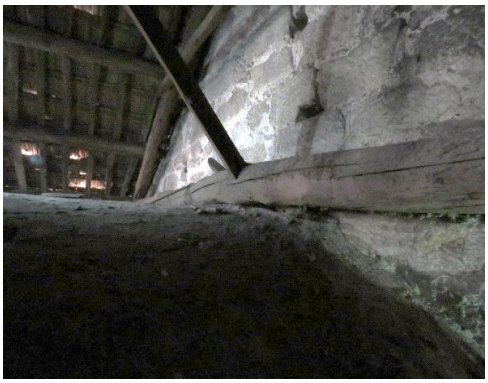


Figura 40 – Indevido funcionamento da asna 5

Descrição: Duas escoras foram inseridas entre a asna 4 e 5 (Figura 38), apoiando-se sobre as linhas das mesmas, acabando por provocar esforços adicionais. Na figura 39 foi colocada uma escora com ligação direta à parede da fachada direita uma vez que a madre 3 junto à asna 4 está completamente podre. Esta escora tem como efeito "empurrar" a parede para fora do seu plano. Na figura 40 é visível a linha da asna 5 a apoiar-se sobre a abóbada, contribuindo para isso a escora que suporta a madre 3.

Tabela 27 - Mapa de danos na cobertura da nave – fissuração

MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da nave
Tipo de dano: Fissuração na zona do arco-cruzeiro

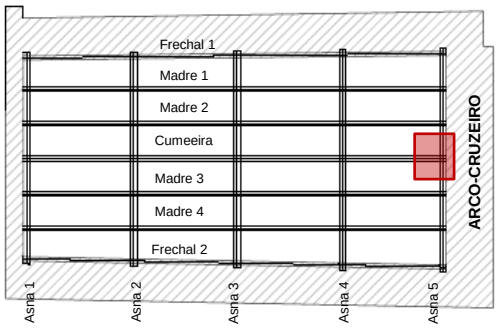




Figura 41- Fissura do arco-cruzeiro na zona da pedra de fecho





Figura 42 – Gatos/Pregagens metálicas no arco-cruzeiro

Descrição: Na zona da pedra de fecho do arco-cruzeiro (Figura 41) existe fissuração acentuada. Associada a esta fissuração central, verifica-se fissuração lateral no muro tímpano sobre o arco-cruzeiro no lado direito (Figura 43) e lado esquerdo (Figura 44). Sendo a fissuração com maior expressão a do lado direito, crê-se que eventuais obras de escavação na rua Fernandes Tomás possam ter dado origem à descompressão do solo na proximidade da fundação da parede originando a sua deformação para fora do plano. Foram observados gatos/pregagens metálicas no arco-cruzeiro pelo lado interior da capela-mor (Figura 42).

Tabela 27 (continuação) - Mapa de danos na cobertura da nave – fissuração

MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da nave
Tipo de dano: Fissuração na zona do arco-cruzeiro

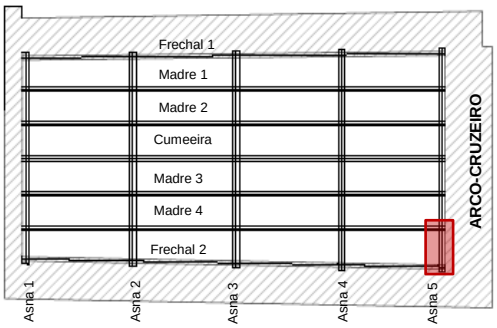




Figura 43 – Fissura sobre o arco-cruzeiro junto à fachada direita

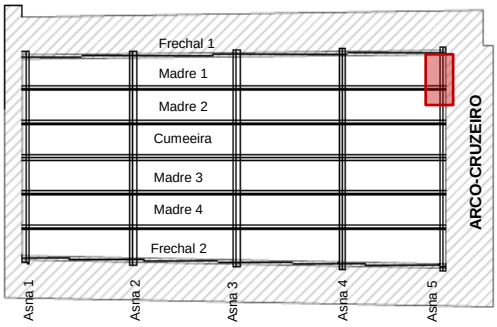
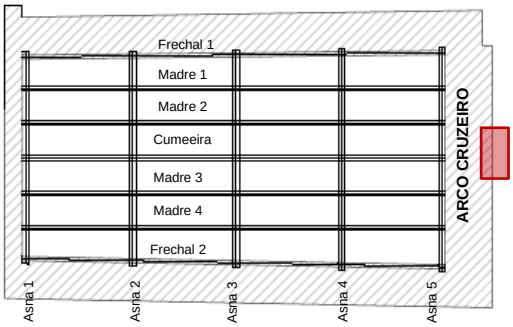




Figura 44 - Fissura junto ao arco-cruzeiro junto à fachada esquerda

Descrição: A fissura representada na figura 43 apresenta uma abertura de cerca de 3 cm e a fissura junto à fachada esquerda (Figura 44) da capela apresenta uma abertura de aproximadamente 1 cm.

Tabela 28 - Mapa de danos na cobertura da capela-mor– fissuração

MAPA DE DANOS
Localização: Interior da cobertura da capela-mor
Tipo de dano: Fissuração na zona da pedra de fecho do arco-cruzeiro
  Figura 45 - Fissura na zona da pedra de fecho do arco-cruzeiro
Descrição: Na figura 45 é visível a mesma fissura da figura 41 (situada na cobertura da nave) encontrando-se bastante mais acentuada deste lado do arco-cruzeiro.

4.2.2 MAPA DE DANOS DO INTERIOR DA CAPELA

Tabela 29 - Mapa de danos do interior da capela– fissuração generalizada no teto

MAPA DE DANOS
Localização: Nave
Tipo de dano: Fissuração no teto

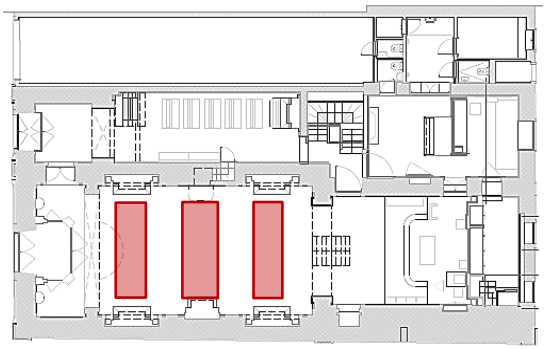
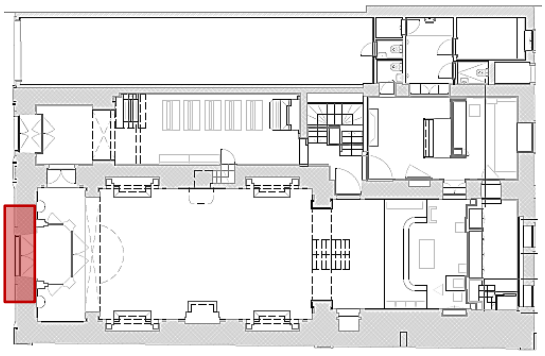




Figura 46 - Fissuração generalizada no teto com predominância na 1ª janela direita



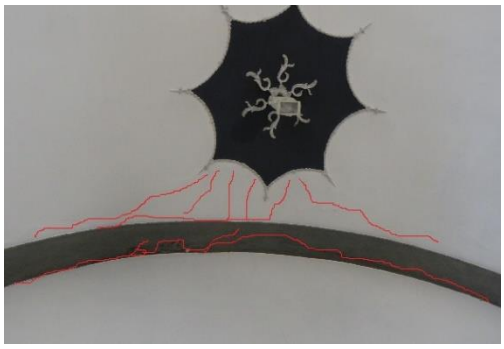


Figura 47 - Fissuração generalizada com predominância no arco acima do vitral

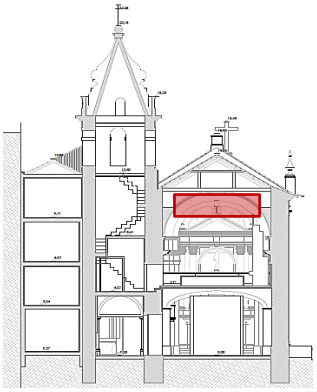




Figura 48 - Fissuração no arco-cruzeiro

Descrição: Fissuração generalizada no reboco da abóbada com predominância na 1ª janela do lado direito (Figura 46). Relativamente à figura 47 é visível fissuração generalizada no teto junto à fachada principal, apresentando fissuração mais expressiva no arco imediatamente acima do vitral. Na figura 48 é percetível a existência de fissuras no arco-cruzeiro.

Tabela 30 - Mapa de danos do interior da capela– fissuração na parede de alvenaria

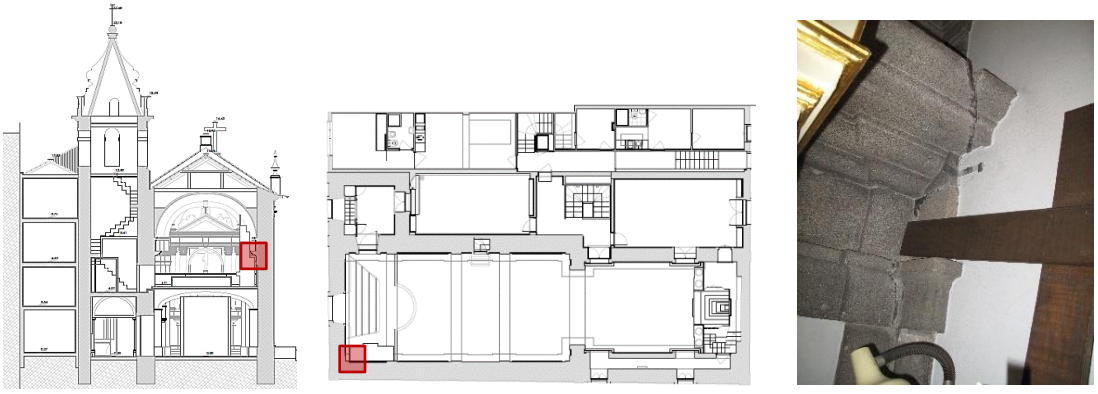
MAPA DE DANOS
Localização: Nave
Tipo de dano: Fissuração na parede de alvenaria interior da fachada principal junto ao coro-alto
 Figura 49 - Fissura na alvenaria de pedra
Descrição: Fissura visível na parede de alvenaria de pedra no cruzamento da fachada principal e o alçado lateral direito (Rua Fernandes Tomás). A fissura apenas se desenvolve junto à parte superior da parede, não apresentando grandes dimensões.

Tabela 31 - Mapa de danos do interior da capela– abertura de juntas

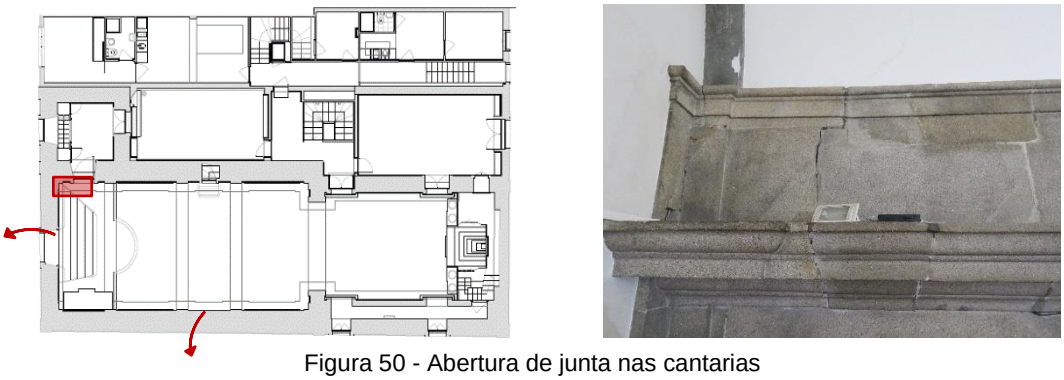
MAPA DE DANOS
Localização: Nave
Tipo de dano: Abertura da junta nas cantarias do coro-alto
 Figura 50 - Abertura de junta nas cantarias
Descrição: Abertura da junta nas cantarias do coro-alto e mesmo fratura da pedra, verificando-se um deslocamento da fachada principal para oeste e da fachada direita para sul.

Tabela 32 - Mapa de danos do interior da capela – problemas de humidade

MAPA DE DANOS
Localização: Nave
Tipo de dano: Humidade na primeira janela esquerda e na cantaria do arco-cruzeiro

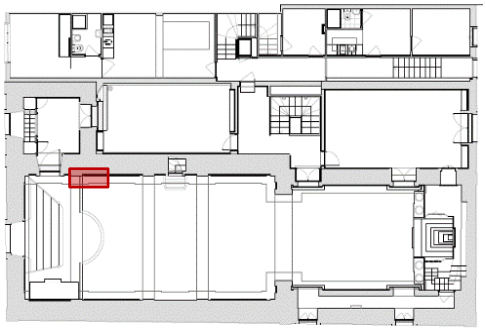




Figura 51 - Humidade na 1ª janela esquerda





Figura 52 - Humidade junto ao arco-cruzeiro

Descrição: Na 1ª janela da esquerda da capela são visíveis problemas de humidade (Figura 51). Além disso encontra-se humidade localizada junto ao chão na zona do arco-cruzeiro (Figura 52), sendo também visível problemas de humidade no interior dos altares embutidos na parede.

Tabela 33 - Mapa de danos do interior da torre sineira– fissuração

MAPA DE DANOS
Localização: Torre sineira
Tipo de dano: Fissuração na parede interior da fachada





Figura 53 – Fratura na padieira da porta de acesso ao coro-alto junto ao acesso da à torre sineira

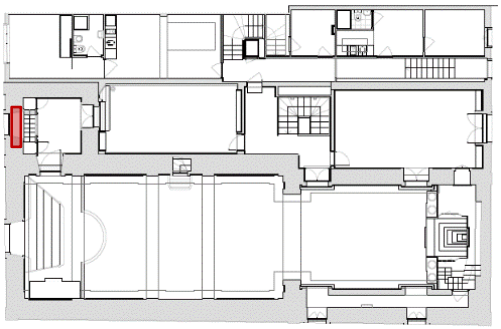




Figura 54 – Abertura de junta da alvenaria de pedra junto da janela da fachada da torre sineira

Descrição: Fissuração ao longo da fachada principal da torre sineira representada na figura 53. A colocação do gato metálico visível na figura não está registada em qualquer documentação. Relativamente à figura 54, é visível uma abertura de junta bastante expressiva na alvenaria de pedra, junto à janela da torre sineira.

Tabela 34 - Mapa de danos do interior da torre sineira – problemas de humidade

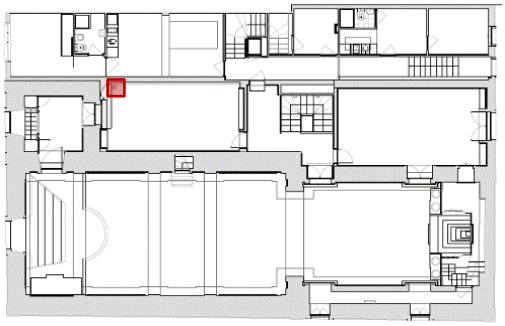
MAPA DE DANOS
Localização: Torre sineira
Tipo de dano: Humidade junto à chaminé da incineração das velas
  Figura 55 - Humidade junto à chaminé da incineração
Descrição: Humidade junto à chaminé da incineração das velas no teto do piso 1.

Tabela 35 - Mapa de danos do interior da capela-mor – fissuração e humidade

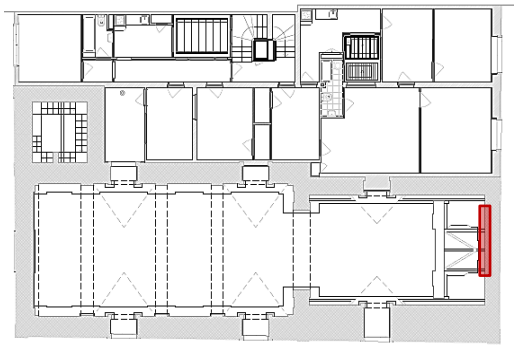
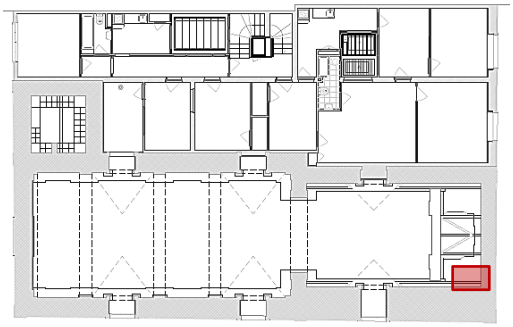
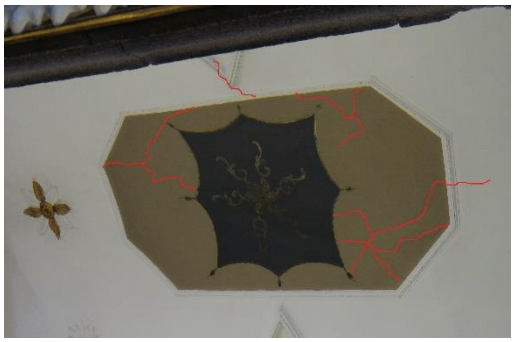
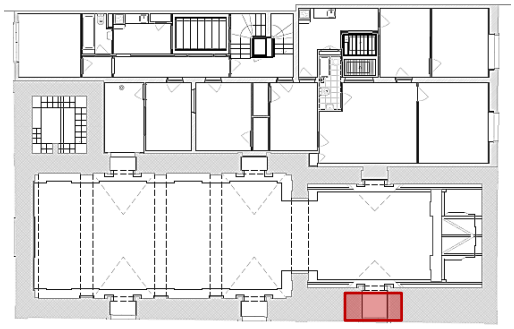
MAPA DE DANOS
Localização: Capela-Mor
Tipo de dano: Fissuração e humidade na zona traseira do altar-mor
  Figura 56 - Fissuração localizada na parede fundeira atrás do altar-mor   Figura 57 - Humidade e fissuras localizadas atrás do altar-mor
Descrição: Com o acesso à zona traseira do altar-mor, através da sacristia, foi possível observar alguns danos, tais como fissuração e humidades.

Tabela 36 - Mapa de danos do interior da capela-mor – fissuração generalizada

MAPA DE DANOS
Localização: Capela-Mor
Tipo de dano: Fissuração generalizada no teto e corredor da galeria da capela-mor
  Figura 58 - Fissuração generalizada   Figura 59 - Fissuração generalizada
Descrição: Fissuração generalizada localizada no teto da capela-mor e ao longo do corredor da galeria. A galeria localiza-se nas proximidades da janela da fachada direita da capela-mor

4.2.2. MAPA DE DANOS DO EXTERIOR DA CAPELA

Tabela 37 - Mapa de danos no exterior da capela – destacamento/empolamento de azulejos

MAPA DE DANOS
Localização: Fachadas da Capela
Tipo de dano: Destacamento/empolamento de alguns azulejos na fachada da capela-mor

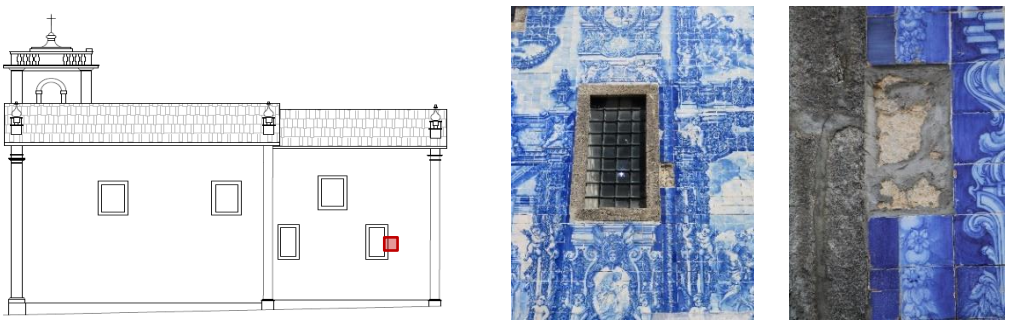
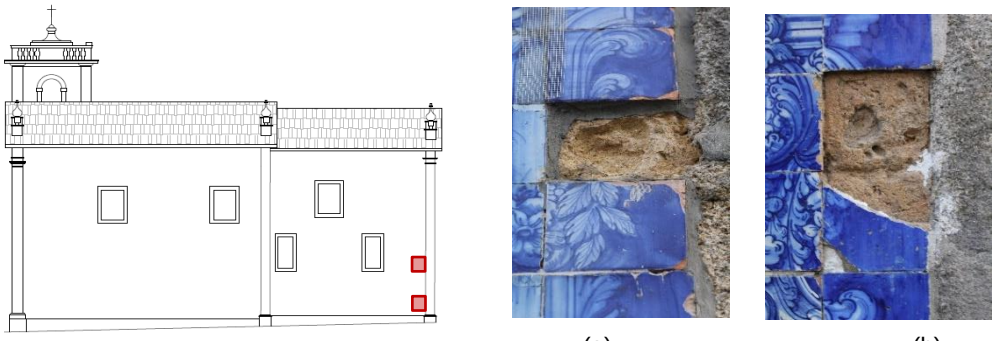


Figura 60 - Queda do azulejo junto à uma das janelas da fachada lateral direita da capela-mor



(a) (b)

Figura 61 - Queda do azulejo junto à alvenaria de pedra na aresta da fachada lateral direita da capela-mor

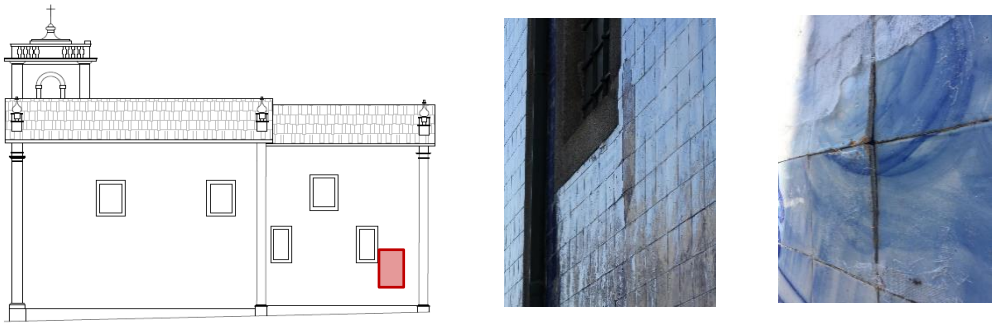


Figura 62 - Empolamento de alguns azulejos.

Descrição: Na fachada lateral direita da capela-mor (Rua Fernandes Tomás) é percetível a inexistência de alguns azulejos. A figura 61a é referente ao dano superior assinalado no alçado, enquanto que a figura 61b é em relação ao dano inferior. Para além do destacamento de azulejos, alguns apresentam empolamento (Figura 62), sendo que parte deles ainda apresentam tela de gaze para evitar a queda dos mesmo. Adicionalmente à queda dos azulejos verificou-se a perda de vidrado em alguns azulejos, não estando estas causas relacionadas

Tabela 38 - Mapa de danos no exterior da capela – degradação do suporte do sino

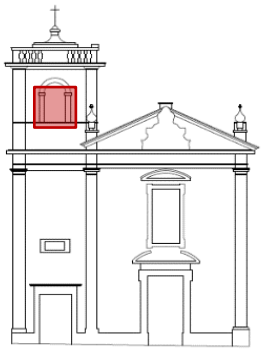
MAPA DE DANOS
Localização: Fachadas da Capela
Tipo de dano: Degradação do cabeçote do sino
 
Descrição: Na fachada da torre sineira é visível a degradação do cabeçote do sino. Tanto os elementos em madeira como os metálicos apresentam um elevado grau de dano.

Figura 63 - Degradação do cabeçote do sino

Tabela 39 - Mapa de danos no exterior da capela – deformação da cobertura da nave

MAPA DE DANOS
Localização: Exterior da cobertura
Tipo de dano: Deformação da cobertura da nave
 
Descrição: Contrariamente à cobertura da capela-mor, toda a cobertura da nave apresenta bastante deformação. Para além da selagem do telhado, foi possível observar que telhas da cobertura da nave se encontravam bastante degradadas. Quanto às telhas da cobertura da capela-mor, devido ao seu estado de conservação e limpeza, certamente foram substituídas recentemente.

Figura 64 - Deformação da cobertura da nave

Após a descrição e análise das patologias encontradas durante a inspeção à Capela das Almas, é necessária a realização de uma comparação dos danos existentes com os danos observados durante a última inspeção (2012). Observando os registos fotográficos desse ano, diponibilizados pelo Instituto da Construção, rapidamente se conclui que os danos maiores, na sua maioria, se mantiveram inalterados. Um caso concreto dessa obervação diz repeito à figura 65 onde está representada uma fissura com abertura de cerca de 3 cm, na qual, perante análise das mesmas, é possível constatar-se que a abertura manteve-se estável ao longo desses anos (2012 a 2018).

Por outro lado, nos registos efetuados no presente ano relativos aos painéis azulejares, verificou-se a falta de alguns azulejos na fachada da capela-mor, assim como o destacamento/empolamento de vários azulejos. Estes danos não registados em 2012 indicam a sua progressão no tempo.

Além das patologias observadas durante a inspeção, foi validada a geometria da asna 2 cujo levantamento foi efetudo em 2012. Refere-se ainda a permanência do candeeiro da nave, pendurado na cumeeira através de um perfil metálico UNP80 que se apoia na madre 2 e 3 (Figura 66). Uma sondagem à abóbada permitiu verificar que esta é de tijolo maciço e possui uma espessura total de 30 cm. O extradorso da abóbada é coberto por argamassa com espessura de 1 cm (Figura 67 e 68).

Importa referir que aquando da inspeção o pavimento do arruamento continha bastantes irregularidades, nomeadamente na tampa de saneamento, que se encontra a uma distância relativamente curta da Capela das Almas. Devido à existência destas irregularidades seria esperado que, aquando da passagem de veículos pesados pelas mesmas, fossem induzidos níveis de vibração elevados na capela. No entanto, antes da fase de monitorização foram efetuadas obras no pavimento da rua Fernandes Tomás, assim, antevem-se que a passagem de veículos pelas reentrâncias originaria níveis de vibração mais reduzidos (Figura 69).

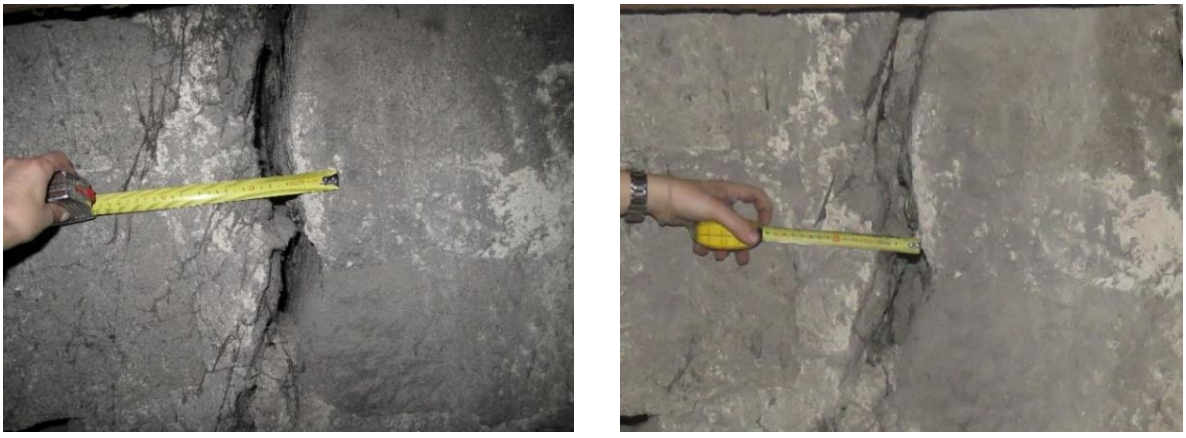


Figura 65 - Comparação do registo fotográfico da fissura localizada na cobertura da Capela das Almas no ano 2012 (esquerda) e no ano 2018 (direita)



Figura 66 - Candeeiro da capela pendurado na cumeeira da cobertura através de um perfil metálico UNP80



Figura 67 - Local a partir da qual foi possível a medição da espessura da abóbada da cobertura e espessura da argamassa

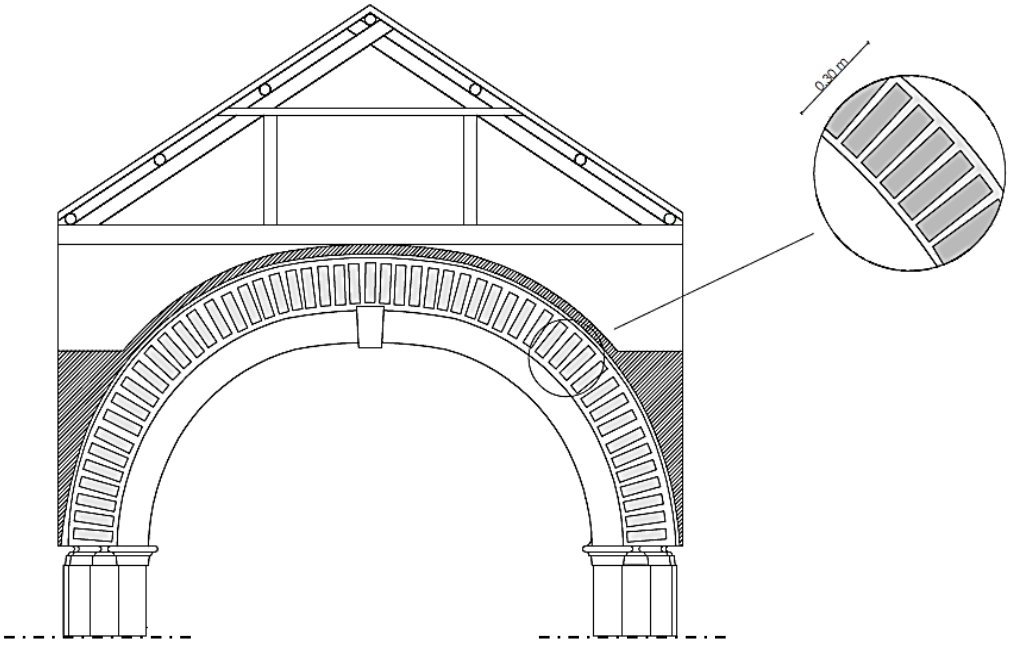


Figura 68 - Esquema da constituição da abóbada



Figura 69 – Pormenor da rua Fernandes Tomás antes da finalização das obras do pavimento

4.2.3. NOTAS FINAIS DA INSPEÇÃO

A análise dos danos observados na Capela das Almas não permitiu obter uma relação direta entre estes e o destacamento/empolamento que se verifica com maior incidência na fachada lateral direita na zona da capela-mor. No entanto, registou-se o destacamento de paredes entre diferentes fachadas, admitindo-se que a parede lateral direita poderá vibrar de forma independente das restantes paredes. Esta parede, na zona da nave, encontra-se travada em altura ao nível da abóbada, sendo que, ao haver descompressão ao nível do arco-cruzeiro e naturalmente da abóbada, possam ocorrer alguns impulsos horizontais no topo da parede não equilibrados. De referir que o apodrecimento do frechal e a existência de uma escora inclinada a apoiar diretamente no topo da parede no desvão da cobertura, são fatores negativos no comportamento estrutural da cobertura e da parede. Na zona da capela-mor, onde se verifica o continuado destacamento/empolamento dos azulejos não foi possível verificar a constituição da abóbada a nível estrutural, avaliar o estado do frechal e, consequentemente, o travamento da estrutura da cobertura e das paredes entre si.

Do lado exterior, na esquina da parede lateral direita com a parede fundeira, verifica-se que o escoamento do tubo de queda das águas pluviais é feito diretamente para o chão dando origem à infiltração da águas. O empolamento/destacamento observado nos azulejos induz a existência de compressão entre faces de azulejos, podendo este fenómeno não estar dependente unicamente das vibrações.

4.3. PLANO DE MONITORIZAÇÃO DAS VIBRAÇÕES DA CAPELA

No sentido de efetuar um plano de monitoração das vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário e ferroviário que afetam a capela, foram estudadas várias soluções para a colocação da instrumentação. De modo a analisar o tipo de acelerómetro mais adequado para registar os níveis de vibração nos azulejos da capela, foram feitos ensaios prévios no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP. Esses ensaios consistiram em medir os níveis de vibração sobre um pedaço de um azulejo da capela cedido pela Reitoria da Capela das Almas recorrendo a diferentes tipos de acelerómetros. Os

ensaios passaram pela análise do tipo de acelerómetro no que respeita à sua sensibilidade, peso e método de fixação. Isto é, apesar dos acelerómetros maiores serem melhores, uma vez que são mais sensíveis, foi necessário ensaiar vários métodos de fixação para garantir que estes não caíssem durante a aquisição de dados e que não danificassem o azulejo aquando da fixação e remoção do acelerómetro.

4.3.1. APARELHOS DE MEDIÇÃO

Com vista à captação de vibrações mecânicas existem vários aparelhos de medição, designados por transdutores. Os acelerómetros são transdutores de aceleração muitos versáteis e por isso são os sensores mais utilizados no contexto do estudo pretendido. Estes aparelhos têm como função converter o sinal vibratório num sinal elétrico, isto é, convertem uma forma de energia noutra forma de energia. O tamanho dos acelerómetros, ou seja, a massa sísmica no interior do transdutor, vai influenciar a gama de frequências "captáveis" e a sua sensibilidade. Geralmente, quanto maior for o transdutor, maior é a sensibilidade e menor a gama de frequências utilizáveis. A sua sensibilidade é medida em milivolts por unidade de aceleração "g" (Sequeira, 2013).

Os acelerómetros testados em laboratório (Tabela 40 e 41), com vista à escolha do transdutor com as características mais adequadas para os fins pretendidos, foram: PCB 393 A03 (1000 mV/g) e PCB 353B03 (10 mV/g)

Tabela 40 - Características do acelerómetro PCB 393A03 (www.pcb.com)



PCB 393A03
Sensibilidade: (± 5 %) 1000 mV/g (102 mV/(m/s^2)
Gama de medição: ± 5 g pk (± 49 m/s^2 pk)
Gama de frequências: 0.5 a 2000 Hz

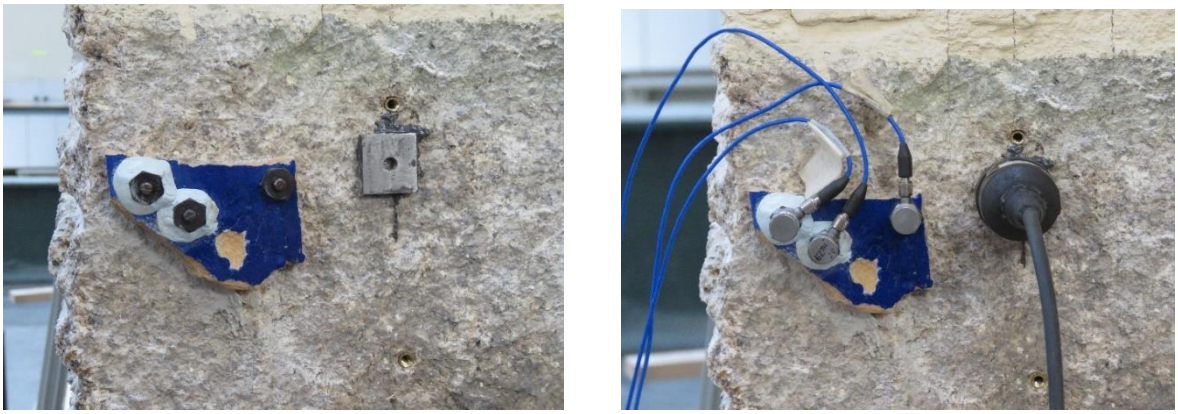
Tabela 41 - Características do acelerómetro PCB 353B03 (www.pcb.com)



PCB 353B03
Sensibilidade: (± 5 %) 10 mV/g (1.02 mV/(m/s^2)
Gama de medição: ± 500 g pk (± 4905 m/s^2 pk)
Gama de frequências : 1 a 7000 Hz

4.3.2. ENSAIOS REALIZADOS NO LABORATÓRIO

Pretendendo que o ensaio fosse o mais próximo da realidade o pedaço de azulejo foi fixado numa estrutura de alvenaria de pedra, através de argamassa de cal hidráulica natural (NHL). Sendo assim, após a colocação do mesmo, começaram a ser ensaiados vários métodos de fixação para testar a aderência dos diferentes tipos de acelerómetros no azulejo. Por outro lado, diretamente na alvenaria foi inserida uma chapa metálica 3x3 cm para suportar acelerómetros com maiores dimensões, de modo a que fossem obtidas leituras adicionais que funcionassem como referência (Figura 70).



(a) (b)

Figura 70 - Ensaios no laboratório tendo em vista a escolha de um acelerómetro: (a) suporte dos acelerómetros; (b) acelerómetros com respetiva cablagem de ligação ao computador

Primeiramente, com vista a testar a remoção dos instrumentos do azulejo sem o danificar, foram colocados três acelerómetros seguidos com uma massa adesiva *Pattex*®. Contudo, devido à elevada adesividade e quantidade do produto, o azulejo danificou-se durante a remoção de um dos acelerómetros, tal como é visível na figura 71. Posto isto, e para o mesmo tipo de acelerómetro, foi utilizado um outro produto de fixação: supercola. Contrariamente ao que se sucedeu com o produto anterior, este acelerómetro (Figura 72) foi facilmente removido por torção após uma ligeira aplicação de um removedor/diluente (Figura 74). No entanto, devido à fragilidade do azulejo é percetível que algum vidrado ficou no acelerómetro após a sua remoção (Figura 73).



Figura 71 - Dano no azulejo de ensaio após remoção do acelerómetro colocado com massa adesiva Pattex®



Figura 72 - Dano no azulejo de ensaio após remoção do acelerómetro colocado com supercola identificado com o círculo



Figura 73 - Acelerómetro removido por torção, onde é visível um ligeiro vidrado do azulejo



Figura 74 - Removedor de cola e diluente utilizados durante a remoção dos acelerómetros

É de notar que antes de se proceder à remoção deste último acelerómetro, foram recolhidos dados dos acelerómetros com o intuito de comparar a resposta dos acelerómetros PCB 353B03 (10 mV/g) e os acelerómetros PCB 393A03 (1000 mV/g) relativamente à recolha da gama das vibrações pretendidas. Desta forma, analisando os dados obtidos no software MATLAB, constatou-se que a diferença entre os dois no que concerne à captação de ruído era muito elevada. O acelerómetro PCB 353B03 tem uma menor sensibilidade, pelo que a captação do ruído foi muito elevada (Figura 75). Assim sendo, optou-se por utilizar apenas acelerómetros do tipo PCB 393A03, uma vez que têm uma sensibilidade muito superior e com isso será possível diferenciar nitidamente o sinal induzido pelo tráfego do sinal sem interesse.

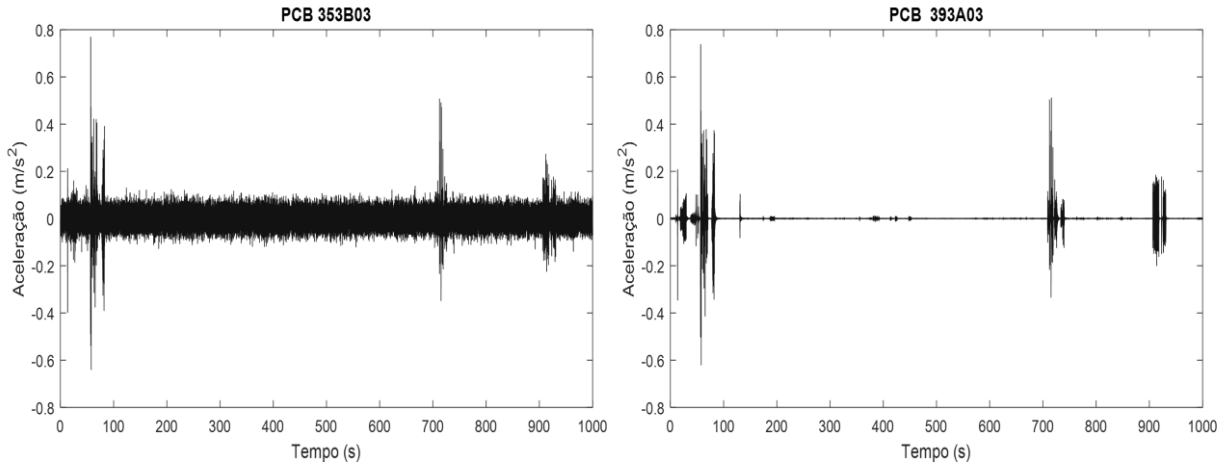


Figura 75 - Comparação do acelerómetro PCB 353B03 (10 mV/g) e PCB 393A03 (1000 mV/g), relativamente à captação de ruído

Dado o exposto, foi necessário realizar ensaios na zona do azulejo com o acelerómetro escolhido. Para tal, foi fixada na zona do azulejo uma placa metálica (3x3cm) através da aplicação de pequenas quantidades de massa adesiva *Pattex*® nos cantos da mesma para facilitar a sua remoção (Figura 76). Porém, contrariamente ao esperado, uma vez que a quantidade de produto foi muito menor do que a

utilizada anteriormente, a dificuldade para remoção da placa foi igualmente elevada, danificando novamente o azulejo (Figura 77).

Levando em consideração os aspetos anteriormente expostos, testou-se por uma última vez fixar o acelerómetro diretamente ao azulejo com supercola. Esta, suportou o peso do acelerómetro PCB 393A03, acabando por ser a solução adotada.



Figura 76 - Azulejo com placa metálica para colocação do acelerómetro PCB 393A03 ± 5g



Figura 77 - Dano no azulejo de ensaio após remoção da placa metálica aplicada com massa adesiva Pattex®

4.3.2. LOCAL ESCOLHIDO PARA A COLOCAÇÃO DOS ACELERÓMETROS

Posteriormente aos ensaios de laboratório, foram escolhidas as posições de cada acelerómetro a colocar na capela tendo em vista a monitorização pelo exterior e pelo interior. No interior foram monitorizadas as fachadas principal e lateral direita (virada para a rua Fernandes Tomás). Na fachada principal a monitorização teve como finalidade efetuar uma análise relativa à ligação da fachada principal com a fachada lateral direita, isto é, a possível existência ou não de um embricamento entre as paredes. Enquanto que na fachada da rua Fernandes Tomás a escolha da localização dos acelerómetros se deveu ao fato de esta ser a frente mais exposta às vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário. Relativamente ao exterior, optou-se por colocar dois acelerómetros na fachada sul da capela-mor, uma vez que a queda de azulejos é incidente nesse local. Assim sendo, foram colocados na totalidade 8 acelerómetros (6 no interior da capela e 2 no exterior) em que as suas posições são numeradas de 0 a 7. Na figura 78 é apresentado um esquema da localização de toda a instrumentação de monitorização da Capela das Almas.



Legenda:

- ○ Acelerómetros colocados no interior da capela.
- ● Acelerómetros colocados no exterior da capela.

Figura 78 - Alçado da fachada principal e da fachada lateral direita e respetivo corte e planta, com a localização dos acelerómetros (Desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco - Capela das Almas)

Com a colocação dos acelerómetros (PCB 393A03) em obra, iniciou-se o registo das vibrações por um período de 6 dias (de 4 a 9 de maio). O período de medições foi definido de modo a abranger dias da semana e um fim de semana, em períodos diurnos e noturnos, dado que a afluência de veículos pesados e respetiva velocidade variam, na sua maioria, de acordo com estas duas variáveis. No entanto, a título experimental, a meio do dia 9 até ao dia 11 de maio, a aquisição de sinal nos locais de possibilidade de troca foi adicionalmente efetuada com outro tipo de acelerómetros. Ou seja, todos os instrumentos foram trocados por acelerómetros do tipo PCB 393B12 (10000 mV/g), à exceção dos acelerómetros colocados nas posições 0, 3 e 4. Este tipo de acelerómetro apresenta uma sensibilidade maior que os anteriores, apresentando-se no capítulo seguinte a diferença desses dois tipos de acelerómetros através dos dados adquiridos. Contudo, na tabela 42 são apresentadas as características do mesmo.

Em virtude do que foi mencionado, para além da monitorização dos veículos pesados que passaram na rua Fernandes Tomás, a Metro do Porto disponibilizou os horários exatos da passagem do metro durante algumas horas de registo, para com isso poder analisar a existência duma eventual correspondência com os níveis de vibrações registados.

Tabela 42 - Características do acelerómetro PCB 393B12 (www.pcb.com)



PCB 393B12
Sensibilidade: (± 10%) 10000 mV/g (1019.4 mV/(m/s^2)
Gama de medição: ± 0.5 g pk (± 4.9 m/s^2 pk)
Gama de frequências: 0.15 a 1000 Hz

4.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS AO PLANO DE MONITORIZAÇÃO

Após todo o processo de ensaios realizados no LESE da FEUP e ponderação dos locais de colocação dos transdutores, foi necessário deslocar-se à Capela das Almas para efetuar a montagem de toda a cadeia de medição. No anexo C.2 estão apresentados alguns registos fotográficos de todo esse processo.

5
ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES

5.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foi descrita a instrumentação considerada para aquisição das vibrações induzidas pelo tráfego. O presente capítulo tem como fim efetuar a análise dos dados adquiridos. Para isso, com recurso ao *software* MATLAB, efetuou-se o tratamento do sinal, isto é, introduziu-se uma integração ao registo para passar as acelerações registadas para velocidades, e aplicou-se uma filtragem. Ao fim deste tratamento, realizou-se uma análise comparativa das velocidades de vibração das partículas registadas com os valores recomendados por algumas normas em vigor atualmente.

5.2. PRINCÍPIOS DE ANÁLISE

Na etapa seguinte à aquisição dos dados, geralmente efetuada no domínio do tempo, é realizada uma mudança para o domínio das frequências para filtrar o sinal e para identificar as frequências dominantes do mesmo. O método de análise de vibrações mais comum, usado para tratamento desse sinal aperiódico é a transformada de Fourier, que consiste na decomposição do sinal do tempo numa série de ondas sinusoidais com diferentes frequências e amplitudes. Contudo, para ser possível o processamento computacional do sinal proveniente dos transdutores, é necessária a realização de uma amostragem, isto é, o sinal contínuo é convertido num conjunto finito de valores espaçados por um intervalo de amostragem (Figura 79) (LNEC, 2000).

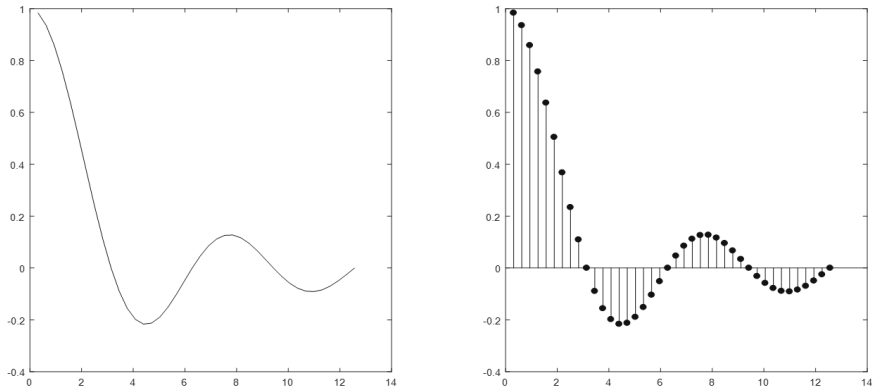


Figura 79 – Exemplo de passagem de um gráfico contínuo (digital) para um gráfico discreto (analógico)

No entanto, é necessário o cumprimento do teorema de amostragem ou Nyquist, que por definição diz que, para que seja possível a reconstrução do sinal original é fundamental que o sinal tenha uma frequência de amostragem, no mínimo, igual ao dobro da frequência contida no sinal analógico. O inverso do intervalo de amostragem não é mais do que a frequência de amostragem (Oppenheim e Schafer, 2014).

De modo a efetuar a alteração dos domínios, é utilizada a transformada discreta e finita de Fourier (TDFF), contudo o cálculo desta é bastante mais rápido e eficiente recorrendo ao algoritmo da transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT). A FFT permite reduzir o esforço computacional uma vez que o número de operações envolvidas é reduzido e, consequentemente os resultados obtidos têm uma precisão numérica maior (Carvalhal *et al*., 2008).

Posteriormente é efetuada a análise de algumas horas de aquisição, isto é, observando a frequência dominante nos espetros da FFT, verificar nessa frequência qual o limite sugerido pelas normas para a velocidade máxima das partículas. As normas selecionadas para efetuar a análise das velocidades de vibração das partículas que atingem a Capela das Almas são as seguintes: DIN 4150-3 (1993), BS 7385-2 (1993) e a NP 2074 (2015). Estas abordam apenas o efeito das vibrações em edifícios, uma vez que o grande objetivo desta dissertação é avaliar se as vibrações induzidas por tráfego poderão estar relacionadas com os danos encontrados durante a inspeção, em particular o destacamento de azulejos da fachada lateral direita (virada para a Rua Fernandes Tomás). Relativamente à norma Suíça, apesar de ser um documento normativo bastante usado internacionalmente, não irá ser usada na avaliação uma vez que não foi possível ter acesso à norma na sua íntegra e assim não saber a necessidade de uma eventual filtragem adicional no sinal.

Relembrando o que foi exposto no capítulo 2, estão apresentados na tabela 43 os limites sugeridos pela norma alemã (DIN 4150-3, 1999) relativamente a vibrações de curta duração que atuem tanto na base como nos pisos mais elevados. Para vibrações de longa duração, a velocidade de vibração das partículas no plano horizontal para pisos mais elevados, considerando toda a gama de frequências, reduz para 10 mm/s em relação à categoria I, 5 mm/s para a categoria II e 2.5 mm/s para a categoria III. Relativamente à tabela 44, presente na norma britânica BS 7385-2 (1993), apresenta os valores limites para danos estéticos induzidos por vibrações transitórias, sendo que no caso de as vibrações serem de origem contínua os níveis de vibração admissíveis reduzem para metade. Quanto aos danos menores e maiores, estes acontecem quando a magnitude da vibração é, respetivamente, o dobro e o quádruplo dos valores tabelados.

Tabela 43 - Velocidades limite (mm/s) para vibrações de curta duração sugeridas pela norma DIN 4150-3 (1999)

Categoria da Estrutura	**Velocidade de vibração na base do edifício (mm/s)**			**Velocidade de vibração no plano horizontal no piso mais elevado do edifício (mm/s).**
	1 a 10 Hz	10 a 50 Hz	50 a 100* Hz	Todas as frequências (Hz)
I- Edifícios comerciais e industriais	20	20 a 40	40 a 50	40
II- Edifícios residenciais	5	5 a 15	15 a 20	15
III- Edifícios sensíveis	3	3 a 8	8 a 10	8

*****As frequências acima de 100 Hz, os valores indicados nesta coluna podem ser usados como valores mínimos

Tabela 46 - Valores limite para danos estéticos induzidos por vibrações transitórias sugeridos pela norma BS 7385-2 (1993)

Tipo de Construção	**Velocidade de vibração das partículas (mm/s)**	
	4 Hz a 15 Hz	≥ 15 Hz
I- Estruturas reforçada ou estruturas industriais e comerciais pesadas	50 mm/s	50 mm/s
II- Estruturas não reforçada ou estruturas residenciais ou edifícios comerciais leves	15 mm/s para 4Hz e 20 mm/s para 15 Hz	20 mm/s para 15 Hz e 50 mm/s para 40 Hz e acima
Para estruturas do tipo II, para frequências inferiores a 4 Hz, não deve ser ultrapassado o valor de deslocamento máximo de 0,6 mm.		

Os valores recomendados pela norma Portuguesa (NP 2074, 2015), apresentados na tabela 45, dizem respeito a velocidades de vibração das partículas em função da frequência dominante e do tipo de estrutura analisada.

Tabela 49 - Valores limite para a velocidade de vibração (mm/s) recomendados pela norma NP 2074 (2015)

Tipo de Estrutura	**Velocidade de vibração das partículas (mm/s)**		
	f ≤ 10 Hz	10 Hz < f ≤ 40 Hz	f > 40 Hz
Sensíveis	1,5	3,0	6,0
Correntes	3,0	6,0	12,0
Reforçadas	6,0	12,0	40,0

5.2.1. PROCESSAMENTO DE SINAL COM MATLAB

Para a realização do tratamento dos dados adquiridos foi utilizado o software MATLAB (MATrix LABoratory). Numa fase inicial foi introduzido no programa o comando *cumtrapz* com vista à integração das acelerações, uma vez que as normas fazem uma abordagem em termos de velocidades. Este comando efetua a integração cumulativa através do método dos trapézios, isto é, através do somatório das áreas de vários trapézios na região sob a função é realizada uma aproximação a um integral definido. Seguidamente, foi inserido um pré-tratamento no sinal com vista à remoção da tendência (por exemplo, originada por funções integradoras), através do comando *detrend*. Por outras palavras, foi efetuada uma correção à linha base de eventuais distorções que o sinal possa conter em relação ao eixo base. (Carvalhal *et al*., 2008). Na figura 80 estão representados dois sinais onde é possível visualizar nitidamente esta correção.

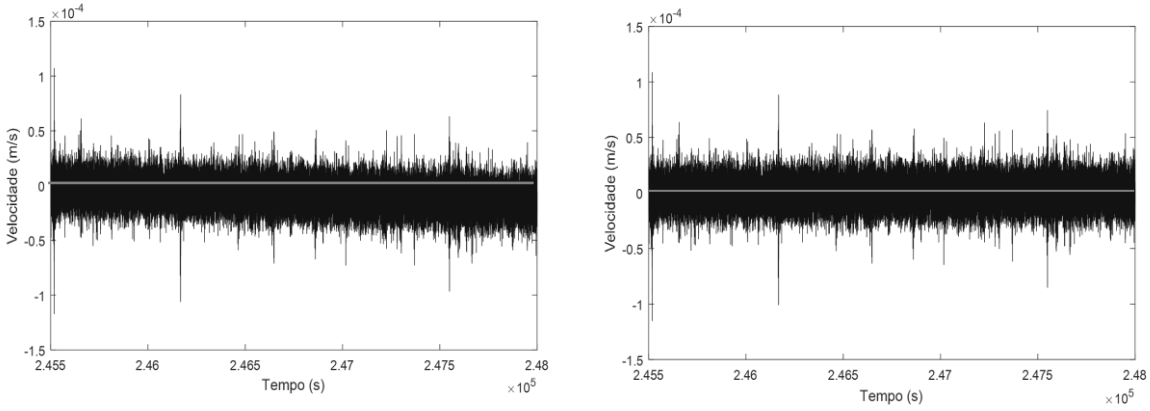


Figura 80 - Comparação do sinal antes e após a correção à linha base

A etapa seguinte foi a realização de uma filtragem do sinal, com recurso aos filtros passa-baixo e passa--alto. Os filtros têm como objetivo eliminar ou atenuar componentes energéticas indesejáveis, tal como o ruído, de maneira a tornar o sinal 'limpo', e assim obter a gama de frequências pretendidas. De referir que o ruído é classificado como todo o sinal destituído de interesse ou indesejável (Carvalhal *et al*., 2008). Em termos ideais, o filtro passa-baixo (FPB) remove as altas frequências do sinal e transmite, sem qualquer distorção, as frequências do zero até à frequência de corte. O filtro passa-alto (FPA) tem características inversas ao FPB (Smith, 1989). A associação destes dois filtros vai conduzir a um filtro passa-banda ideal, isto é, somente as frequências dentro da banda pretendida passam.

Conforme mencionado no capítulo 2, a norma BS 7385-1 (1990) indica um intervalo de frequências entre 1 e 80 Hz como resposta das estruturas para fontes como o tráfego. No entanto, de acordo com Hunaidi (2000) o tráfego rodoviário tende a produzir vibrações com frequências no intervalo de 5 a 25 Hz. Perante isto, foi aplicado um filtro passa-baixo de 80 Hz e um filtro passa-alto de 1 Hz, sendo que a gama de frequências de maior interesse é no intervalo indicado anteriormente.

Na *Toolbox* do Processamento de sinal do MATLAB existe uma variedade de filtros digitais disponíveis. Todas as funções para esses filtros utilizam a frequência normalizada (w_n) , isto é, a frequência em Hz é dividida pela frequência de Nyquist. Por exemplo, no caso de estudo o sistema tem uma frequência de amostragem de 256 Hz, a frequência de 80 Hz irá ter uma frequência normalizada de 80/(256*0.5)=0,625. É de notar que, esta frequência de amostragem passou por uma operação de decimação, isto é, sem perder o conteúdo importante do sinal, a taxa de amostragem foi reduzida de 2000 Hz para 256 Hz para que a leitura de dados se tornasse mais rápida e com menos ruído.

Dado o exposto, o filtro digital utilizado neste estudo foi o Butterworth, caracterizado pela função seguinte:

$$[b, a] = butter\ (n, W_n) \tag{7}$$

Com esta função é possível a conceção de filtros de ordem n, com frequência de corte normalizada W_n entre [0,1], sendo o valor máximo de W_n correspondente à frequência de Nyquist, ou seja, metade da frequência de amostragem. Como referido anteriormente, no caso de estudo foram utilizados filtros passa-alto e filtros passa-baixo, pelo que nos argumentos da função *butter* acrescenta-se a instrução

'*high*' e '*low*', respetivamente (Morais e Vieira, 2006). De seguida são apresentadas algumas funções do código de MATLAB utilizadas no caso de estudo:

```
%Frequência de amostragem (Hz)
fs = 1/real_dt;
real_dt=0.003906; %Intervalo de amostragem ou passo (Hz)

% cálculo da velocidade
 x = cumtrapz(time_aux,xx);

 % baseline correction
 x = detrend(x);

% Filtro passa-baixo (FPB)
cuttoff = 80; % frequência de corte (Hz)
w = cuttoff/(0.5*fs); % Frequência normalizada
[b,a]=butter(10,w,'low'); % FPB Butterworth de 10ª ordem

% Filtro passa-alto (FPA)
cuttoff = 1.0; % frequência de corte (Hz)
w = cuttoff/(0.5*fs); % Frequência normalizada
[b,a]=butter(6,w,'high'); %FPA Butterworth de 6ª ordem
```

Na realidade os filtros ideais não existem. Todavia, fazendo uma análise cuidada e estudando o filtro para cada caso concreto é possível escolher um filtro que se aproxime das características ideais (Figura 81). Para o filtro Butterworth, tal como é demonstrado no exemplo da figura 82, é necessário que a ordem de grandeza do filtro seja superior para que sejam rejeitadas as frequências pretendidas e assim se aproxime do filtro ideal. Por isso, para o caso de estudo foi escolhido um filtro passa-baixo de 10ª ordem e um filtro passa-alto de 6ª ordem.

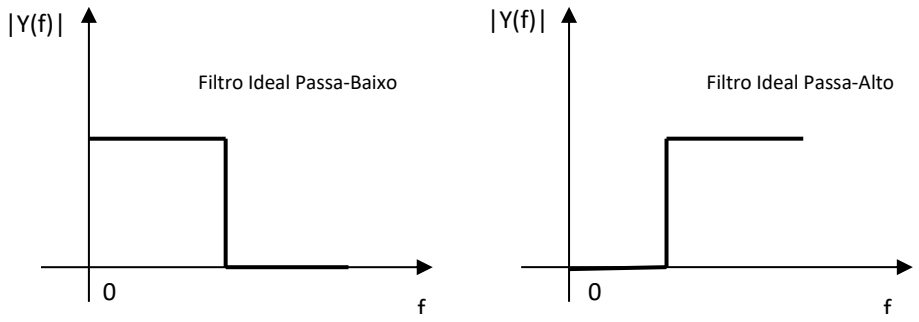


Figura 821 - Filtro ideal passa-baixo e passa-alto

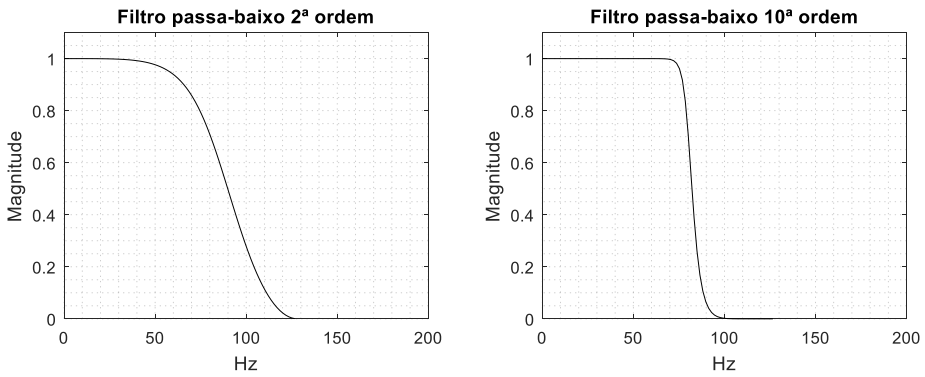


Figura 82- Comparação do filtro passa-baixo de 2ª ordem e 10ª ordem

5.3. AVALIAÇÃO DOS LIMITES DE VIBRAÇÃO

5.3.1. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

A aquisição do sinal foi efetuada durante cerca de oito dias, pelo que apenas a informação com maior relevância será apresentada neste capítulo. Os restantes resultados podem ser encontrados no anexo D. Convém referir que a identificação dada a cada um dos acelerómetros vem de encontro com a posição dos mesmos na Capela das Almas. Assim, de modo a facilitar a leitura deste capítulo na figura 83 é novamente apresentada a posição de todos os acelerómetros.

Sendo assim, devido à extensa quantidade de dados obtidos, foi necessário organizar os dados de modo a facilitar a leitura dos mesmos. Assim sendo, optou-se por agrupar os dados num certo intervalo de horas semelhantes em cada dia de aquisição. Um exemplo disso é a tabela 46, extraído dum ficheiro Excel, em que são apresentadas as velocidades máximas obtidas em cada transdutor durante o período de cerca de oito horas de aquisição entre o dia 5 e 11 de maio. Além disso, o quadro é complementado com uma formatação condicional (isto é, as colunas horizontais vermelhas sobre cada valor), para uma melhor perceção dos valores mais elevados de cada canal.



Figura 83 - Alçado da fachada principal e da fachada lateral direita com a localização dos acelerómetros (Desenhos fornecidos pela Venerável Irmandade das Almas e chagas de São Francisco - Capela das Almas)

Tabela 52 - Velocidade máximas (mm/s) obtidas em todos os canais do dia 5 a 11 de maio

DIA 5

	Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
23:42 - 00:50	0.08078	0.05371	0.0627	0.02392	0.2594	0.04575	0.07417	0.1025
00:50 - 01:58	0.0889	0.06205	0.1325	0.02852	0.174	0.05141	0.06922	0.09849
01:58 - 03:06	0.1015	0.04829	0.09454	0.02724	0.2088	0.0689	0.07072	0.1455
03:06 - 04:13	0.1188	0.04054	0.127	0.04056	0.197	0.04734	0.07916	0.1625
04:13 - 05:20	0.05413	0.04453	0.06276	0.02783	0.08765	0.04972	0.06062	0.07089
05:20 - 06:27	0.05881	0.04304	0.06563	0.02764	0.1234	0.0305	0.05608	0.08235
06:27 - 07:35	0.07744	0.1845	0.09906	0.1082	0.1585	0.1412	0.2942	0.134

DIA 6

	Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
23:37 - 00:45	1.083	0.2628	0.7383	0.05096	2.143	0.2422	0.6058	0.5921
00:45 - 01:52	0.2522	0.1098	0.4913	0.03955	1.308	0.2778	0.1792	0.1802
01:52 - 02:59	0.2638	0.08138	0.6439	0.03031	0.8079	0.2196	0.1265	0.2098
02:59 - 04:05	0.07872	0.0839	0.1003	0.02921	0.1578	0.05305	0.05592	0.08824
04:05 - 05:11	0.1099	0.07445	0.08103	0.02581	0.2288	0.07902	0.1202	0.1194
05:11 - 06:18	0.09172	0.04865	0.09672	0.144	0.2118	0.04713	0.09321	0.1753
06:18 - 07:24	0.1083	0.09877	0.06774	0.07452	0.1791	0.1111	0.1235	0.108

DIA 7

	Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
00:15 - 01:21	0.1644	0.06711	0.2385	0.06475	0.6365	0.1691	0.09994	0.3082
01:21 - 02:27	0.08523	0.09631	0.07458	0.05236	0.2082	0.05467	0.06113	0.1047
02:27 - 03:33	0.0676	0.05287	0.0856	0.05421	0.2067	0.04283	0.06269	0.1088
03:33 - 04:39	0.1141	0.04315	0.08873	0.04188	0.1215	0.04132	0.0639	0.1047
04:39 - 05:45	0.07842	0.08238	0.1306	0.04369	0.8474	0.03768	0.06272	0.1235
05:45 - 06:53	0.09143	0.07258	0.07487	0.1431	0.1204	0.07728	0.09777	0.08494
06:53 - 08:00	1.222	0.3923	0.4218	0.2242	1.186	0.545	0.5745	0.5967

DIA 8

	Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
00:15 - 00:59	0.1208	0.05557	0.0743	0.04869	0.5122	0.04343	0.06286	0.09448
00:59 - 02:05	0.08272	0.04194	0.08331	0.07779	0.4979	0.03959	0.0851	0.1747
02:05 - 03:12	0.06519	0.04606	0.09934	0.02823	0.4064	0.03214	0.06121	0.1634
03:12 - 04:17	0.06498	0.04118	0.08438	0.02532	0.5614	0.04968	0.06359	0.07143
04:17 - 05:23	0.06569	0.04348	0.07106	0.02746	0.7981	0.04156	0.06527	0.0655
05:23 - 06:29	0.09739	0.04498	0.07058	0.02615	0.3036	0.04423	0.06994	0.09034
06:29 - 07:36	0.08858	0.2416	0.211	0.2387	0.7587	0.293	0.2257	0.08291

DIA 9

	Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
00:10 - 01:17	0.1192	0.06258	0.09422	0.1248	0.5467	0.1478	0.239	0.205
01:17 - 02:25	0.08057	0.04499	0.1246	0.278	0.6051	0.04049	0.07053	0.1002
02:25 - 03:31	0.08475	0.03919	0.09972	0.1113	0.4156	0.04482	0.0621	0.09417
03:31 - 04:38	0.1124	0.04865	0	0.1053	0.3582	0.05616	0.1063	0.1067
04:38 - 05:44	0.08971	0.04548	0.1075	0.1686	0.2328	0.0421	0.06279	0.1316
05:44 - 06:51	0.1695	0.04535	0.1027	0.1248	0.6126	0.04509	0.08145	0.1757
06:51 - 07:59	0.1057	0.1775	0.0993	0.1067	0.6098	0.115	0.2479	0.2104

DIA 10

	Acc_0	Acc_25	Acc_26	Acc_3	Acc_4	Acc_24	Acc_23	Acc_31
23:42 - 00:50	0.09613	0.3346	0.2109	0.02299	0.4508	0.04719	0.3401	0.1308
00:50 - 01:58	0.1164	0.02817	0.1966	0.02146	0.2448	0.04712	0.05485	0.0889
01:58 - 03:06	0.1531	0.04234	0.2159	0.02276	0.3382	0.05275	0.09214	0.1244
03:06 - 04:13	0.09367	0.03281	0.2146	0.02319	0.3963	0.0625	0.05721	0.07802
04:13 - 05:20	0.1167	0.03358	0.2031	0.02284	0.2079	0.04366	0.04319	0.07282
05:20 - 06:27	0.07913	0.03828	0.2083	0.02429	0.7251	0.03378	0.05017	0.08327
06:27 - 07:35	0.1082	0.06151	0.2199	0.07875	0.3846	0.05022	1.248	0.1607

DIA 11

	Acc_0	Acc_25	Acc_26	Acc_3	Acc_4	Acc_24	Acc_23	Acc_31
23:37 - 00:59	0.1882	0.09693	0.2094	0.02861	0.2442	0.1745	0.1038	0.169
00:59 - 02:05	0.6767	0.4126	0.2109	0.02245	0.5293	0.5075	0.1646	0.1812
02:05 - 03:12	0.1733	0.05907	0.201	0.03191	1.267	0.05191	0.07535	0.1804
03:12 - 04:17	0.09223	0.04369	0.2052	0.02239	0.4141	0.04161	0.04258	0.1238
04:17 - 05:23	0.1411	0.0375	0.2003	0.02485	0.3715	0.05104	0.06915	0.165
05:23 - 06:29	0.1432	0.05097	0.2258	0.02605	0.6395	0.05855	0.07765	0.1379
06:29 - 07:36	0.06171	0.02348	0.2013	0.02325	0.3286	0.04016	0.1486	0.06766

De um modo geral, observando as barras preenchidas do quadro, facilmente se observa que o acelerómetro Acc_4 (colocado no azulejo) registou os valores de velocidades mais elevadas. É importante mencionar que, do dia 5 ao dia 9 de maio foram utilizados oito acelerómetros do tipo PCB 393A03 (1000 mV/g), porém do dia 10 a 11, seis desses instrumentos foram substituídos por acelerómetros do tipo PCB 393B12 (10000 mV/g). Todos os valores aqui apresentados, incluindo a aquisição com diferentes tipos de acelerómetros, têm uma ordem de grandeza semelhante visto serem apresentadas na tabela apenas as velocidades máximas. Contudo, analisando a figura 84, relativa a um registo do sinal no mesmo local e na mesma hora por acelerómetros diferentes, verifica-se que o nível de ruído captado pelo acelerómetro PCB 393B12 é inferior. Tal situação deve-se ao facto de a sensibilidade deste último ser cerca de 10 vezes maior comparativamente com o PCB 393A03.

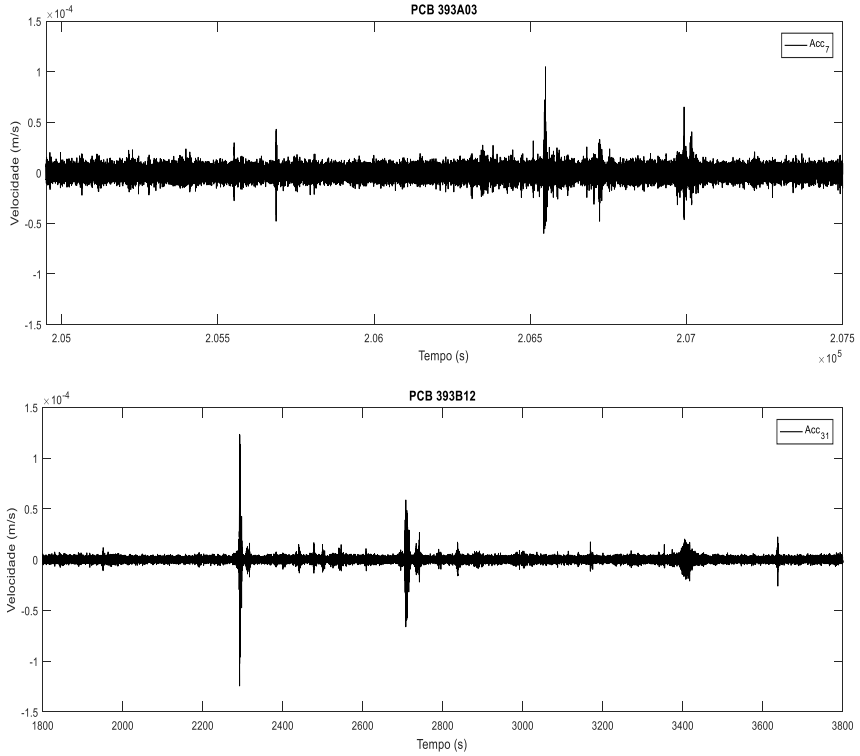


Figura 84 - Comparação de um registo efetuado como o acelerómetro PCB 393A03 (1000 mV/g) e PCB 393B12 (10000 mV/g)

Apesar dos valores apresentados na tabela estarem dispostos de modo a que a leitura dos inúmeros dados seja simplificada, apenas graficamente é exequível a compreensão do registo do sinal em cada acelerómetro ao longo do tempo. Deste modo, na figura 85, estão expostos os gráficos referentes à primeira hora do dia 7 (00h-01h) para assim se efetuar uma comparação dos resultados que cada instrumento registou.

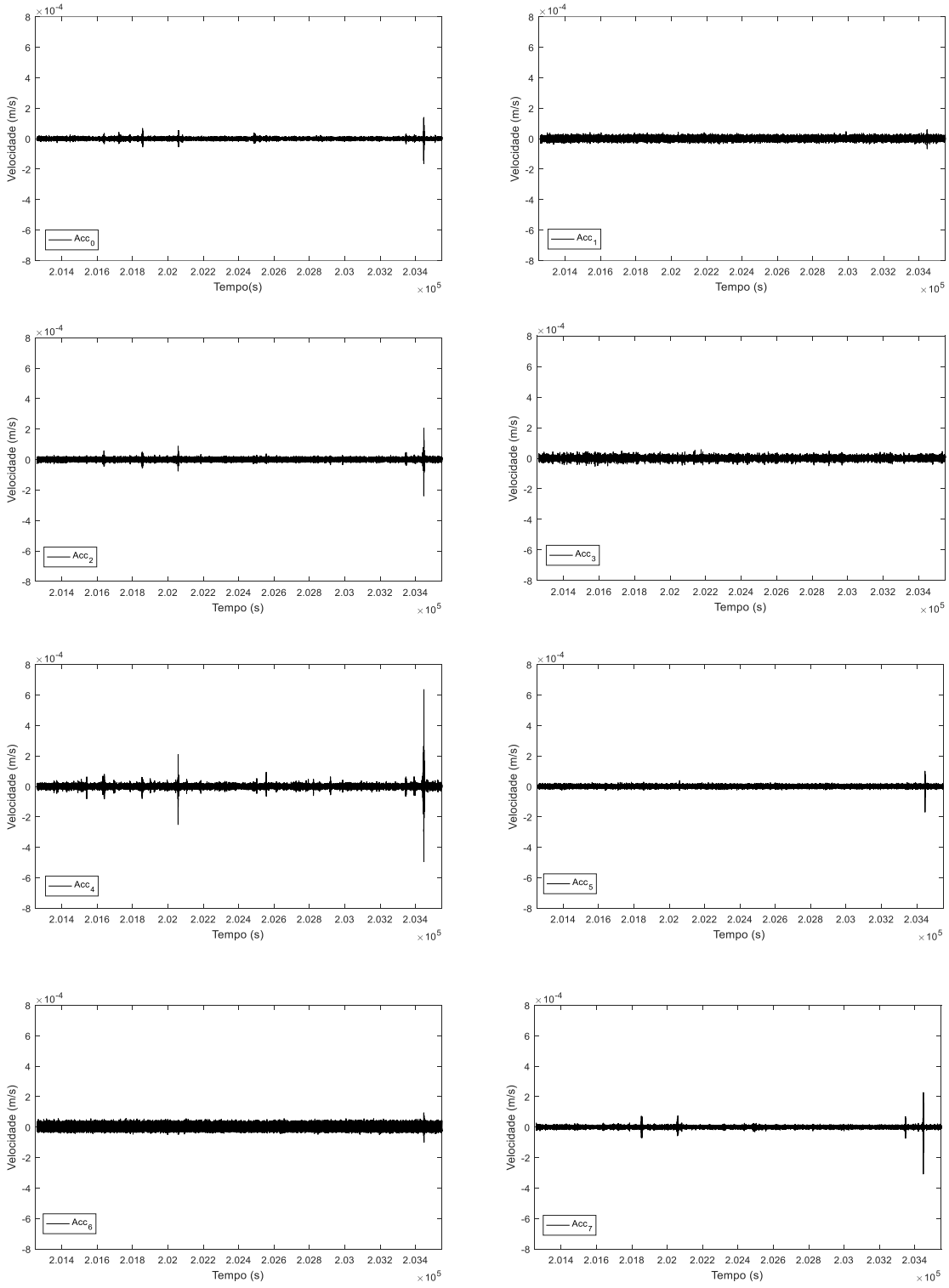


Figura 85 - Registo efetuado em todos os canais de aquisição durante uma hora (00h-01h)

Perante a posição e modo como foram colocados os acelerómetros Acc_1, Acc_5 e Acc_6 seria de esperar que os resultados obtidos dispusessem de um registo muito semelhante. No entanto, tal não sucedeu, uma vez que o nível de ruído no Acc_6 é cerca do dobro. Isto deveu-se ao facto de a ligação do acelerómetro ao cabo de transmissão não estar nas melhores condições, sendo que tal sucedido apenas foi detetado aquando da troca de acelerómetros (dia 9).

No que diz respeito aos acelerómetros Acc_0 e Acc_7, e relembrando que o Acc_0 se encontra colocado na fachada da rua Fernandes Tomás e o Acc_7 (à mesma cota) na fachada principal, ao analisar os registos dos mesmos facilmente se identifica uma semelhança entre os dois registos. Em relatórios antecedentes foi possível concluir que ao nível da cobertura as paredes de alvenaria de pedra se encontravam desligadas, contudo os registos obtidos neste estudo não indicam existência de um comportamento dinâmico distinto das duas paredes (fachada principal e fachada lateral direita). No entanto, deve-se salientar que a solicitação dinâmica (ambiental) utilizada foi de baixa intensidade podendo não ser suficiente para evidenciar um comportamento diferenciado das duas paredes. Na figura 86 é representado um gráfico, que compara três dias consecutivos de aquisição de dados no Acc_0 e Acc_7, e onde é clara a semelhança dos dois registos.

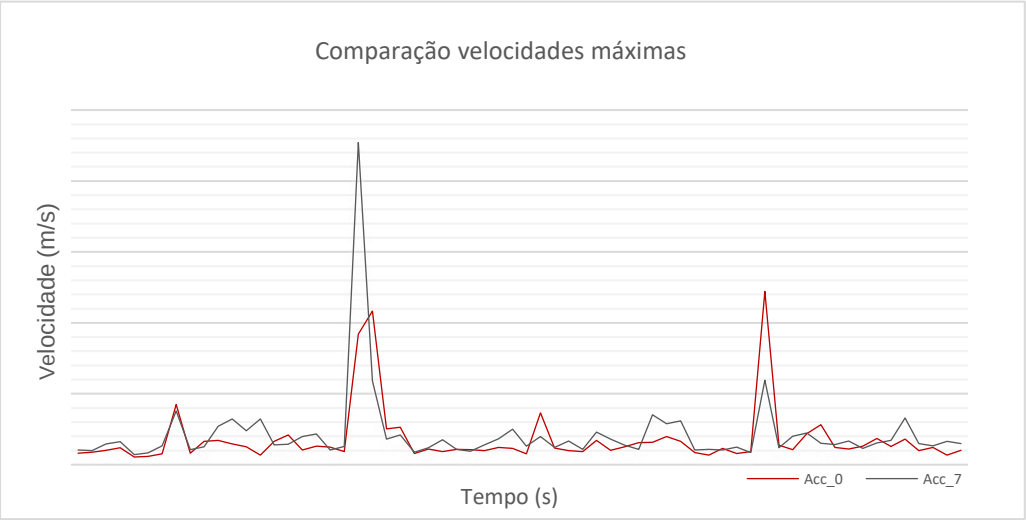


Figura 86 - Comparação do registo efetuado no acelerómetro Acc_0 e Acc_7

Os acelerómetros Acc_0, Acc_2 e Acc_4, posicionados praticamente à mesma cota e na mesma fachada, registaram um sinal muito semelhante, realçando que o Acc_4 foi colocado no azulejo exterior da capela, e por isso captou picos de vibração mais altos. No entanto, ao analisar o sinal do Acc_3 verifica-se alguma inconsistência, uma vez que colocado no exterior e à mesma cota que os anteriores, registou um sinal mais similar aos sinais registados nos acelerómetros que foram colocados na base da capela.

Assim sendo, foi analisado um novo conjunto de sinais (Figura 87) de modo a perceber se o registo do Acc_3 apresentava a mesma falta de consistência.

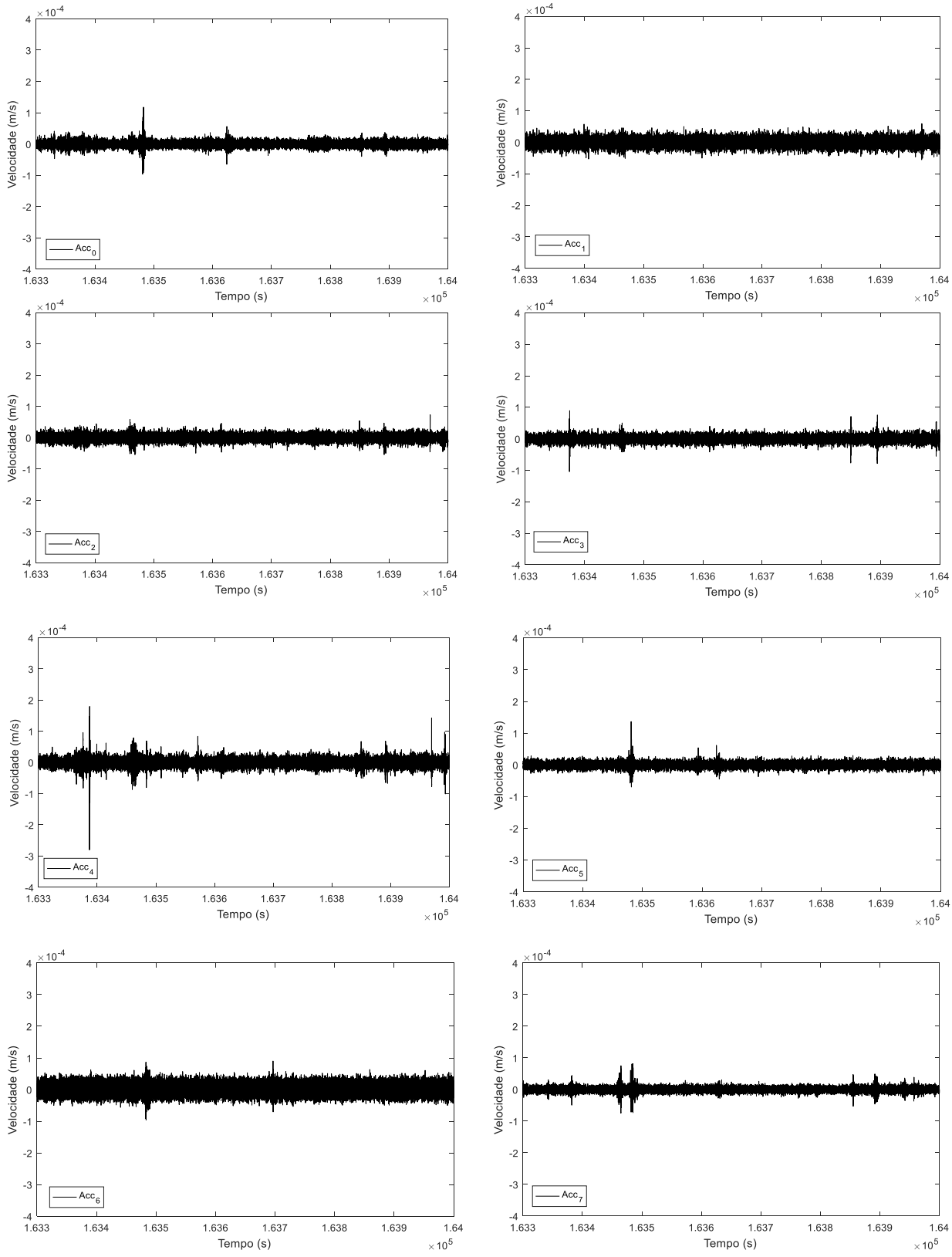


Figura 87 - Registo efetuado em todos os canais de aquisição durante uma hora (14h-15h)

Neste conjunto de registos, é notória a consistência dos registos dos acelerómetros Acc_0, Acc_2, Acc_3 e Acc_4. O Acc_2 apesar de colocado no óculo da fachada, ou seja, num pano de alvenaria de granito com menor espessura/menor rigidez (Figura 88), apresenta um registo de sinal muito semelhante ao registado no Acc_3.

Em relação ao acelerómetro Acc_4, ainda que esteja posicionado ao mesmo nível que o Acc_3 está colocado num elemento decorativo, o azulejo. Dado este estar suportado por uma argamassa cujas características e condições de aderência não são conhecidas, pode ocorrer uma amplificação do sinal. Atendendo à baixa intensidade do ruído do sinal medido neste acelerómetro, esta potencial amplificação é identificada sem dificuldade.

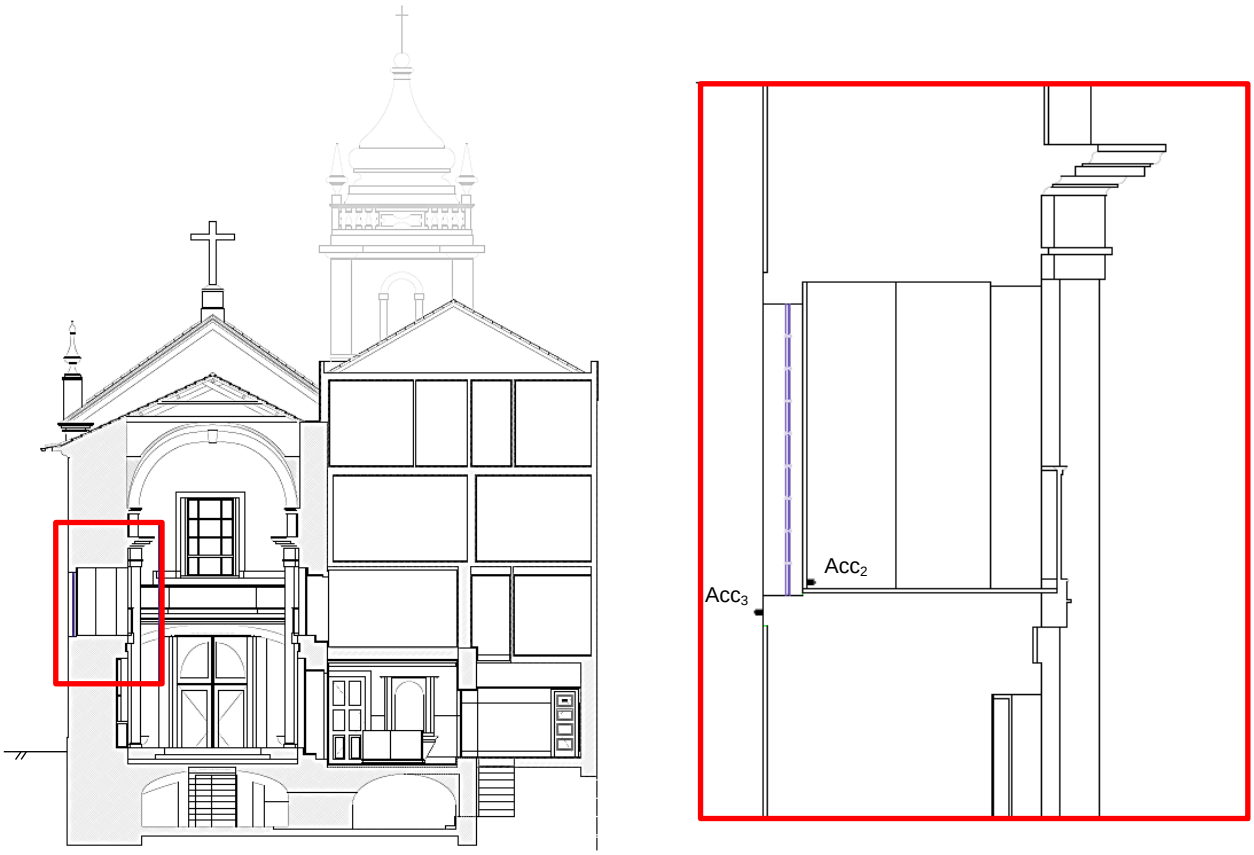


Figura 88 - Pormenor da posição dos acelerómetros Acc_2 e Acc_3

A exposição dos dados anteriores teve como objetivo apresentar uma visão global da informação que seria de esperar durante os dias de aquisição, isto é, serem atingidos valores superiores no acelerómetro colocado no azulejo (Acc_4), relativamente aos restantes instrumentos. Contudo, tal não acontece durante todas as alturas do dia, sendo que alguns desses valores ultrapassam os limites estipulados pelas normas. Recorde-se que, para estabelecer o valor limite com base nos documentos normativos, que deverá ser usado para comparação dos níveis de vibração medidos, numa primeira fase é necessário analisar os espectros em frequência dos registos que, à partida, são elevados de acordo com o conteúdo das normas.

Na tabela 47 estão apresentados os valores das velocidades de vibração máximas das partículas, em mm/s, que foram atingidas nos acelerómetros durante o período de medição de 4 a 8 de maio. Alguns desses valores encontram-se destacados a azul, uma vez que não são valores padrão para vibrações induzidas por tráfego. De acordo com Hunaidi (2000), as amplitudes de vibração típicas, medidas como velocidade, encontram-se na gama de 0.05 a 25 mm/s, sendo por isso destacados os valores que ultrapassem esse intervalo. Com recurso ao MATLAB, observou-se o sinal de alguns desses dados (Figura 89) e concluiu-se que esses picos são causados, provavelmente, de impulsos produzidos por pancadas acidentais no equipamento (aquando da limpeza ou pessoas a mexer), dado que os respetivos acelerómetros estavam em posições onde tal podia acontecer.

Tabela 54 - Velocidades máximas (mm/s) atingidas em todos canais com anomalias

	Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 4	0.31	**43.62**	**2.35**	**2.43**	**1.39**	**2.70**	**3.40**	**0.28**
Dia 5	0.92	**3.87**	**2.82**	**2.44**	3.47	**2.16**	**1.53**	2.27
Dia 6	1.08	**3.96**	**2.03**	**87.79**	2.14	**3.07**	**2.44**	0.59
Dia 7	1.22	**8.44**	**4.00**	**1.16**	1.46	**2.07**	**7.91**	0.60
Dia 8	0.41	1.13	**181.10**	0.43	3.50	0.79	0.80	0.62
Máximos	1.22	**43.62**	**181.10**	**87.79**	3.50	**3.07**	**7.91**	2.27

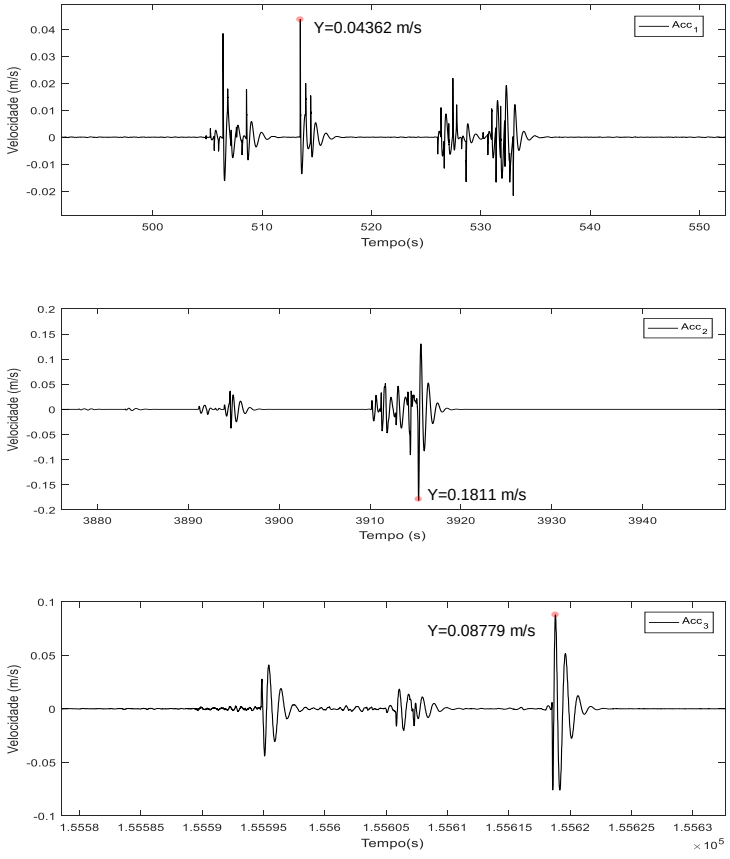


Figura 89 - Registos de sinais que se julgam serem originados por possíveis pancadas acidentais no equipamento

Por outro lado, os valores destacados a vermelho encontram-se dentro da gama de valores expectáveis para vibrações induzidas por tráfego. Contudo, após uma análise detalhada de cada um desses valores, percebeu-se que estes poderiam ser devido a anomalias que ocorreram durante o período de aquisição, dado estes terem acontecido exatamente no mesmo instante para quase todos os acelerómetros. Por outras palavras, para um pico de velocidade de um acelerómetro ocorrido num determinado momento, à mesma milésima de segundo ocorreram outros picos noutros acelerómetros. Isto é, durante a captação do sinal em diferentes acelerómetros não ocorreu nenhum desfasamento do sinal, nomeadamente em acelerómetros em diferentes fachadas. Por exemplo, no dia 7 os acelerómetros Acc_1 e Acc_6, que se encontram a uma distância um do outro de mais de 20 metros, registaram picos de velocidades muito semelhantes. Contudo, o Acc_5 que se encontra numa posição intermédia a esses dois acelerómetros e a uma cota praticamente igual não registou esses picos. Assim sendo, estes valores não foram considerados como valores produzidos por veículos, não sabendo origem dos mesmos.

Após o exposto, foi necessário atribuir classes estruturais à Capela das Almas de tal modo que seja possível perceber se os documentos normativos são cumpridos. Sendo assim, apesar do caso de estudo ser um edifício histórico e com valor patrimonial, optou-se por considerar que, em termos da resposta estrutural, o edifício comporta-se como um edifício corrente/residencial. Isto porque, toda a sua estrutura é em alvenaria de granito e é pouco razoável considerar que com a ação do tráfego cause danos maiores. Contudo, os azulejos da capela foram inseridos na categoria sensível, não só pelo seu valor patrimonial mas também por serem elementos decorativos suscetíveis a maiores impactos. Posto isto, para os dados adquiridos no acelerómetro Acc_4, o limite mínimo proposto pelas normas estudadas é de 1,5 mm/s, enquanto que nos restantes acelerómetros é de 3 mm/s. É importante referir, que ambos os limites correspondem à norma portuguesa NP 2074 (2015) somente porque, das normas em análise, é a que impõe os valores mais restritivos.

Todo este processo é apenas uma "pré-análise" dos dados adquiridos, uma vez que os níveis impostos pelas normas são em função das frequências dominantes registadas, de tal modo que só após a análise dos espectros das frequências é que é possível comparar uma velocidade máxima das partículas com um valor limite. Assim, na tabela 48, os valores que se encontram destacados a vermelho dizem respeito a valores que ultrapassam os limites admitidos inicialmente e serão analisados no domínio da frequência com vista à identificação da frequência dominante. Pelas razões referidas, os valores anteriormente destacados foram retirados.

Tabela 55 - Velocidades máximas (mm/s) atingidas em todos os canais

	Acc_0	**Acc_1**	**Acc_2**	**Acc_3**	**Acc_4**	**Acc_5**	**Acc_6**	**Acc_7**
Dia 4	0.147	0.709	0.205	0.147	0.651	0.131	0.545	0.220
Dia 5	0.920	0.521	0.650	1.832	**3.470**	0.414	1.230	2.271
Dia 6	1.083	0.654	0.738	**3.141**	**2.143**	0.278	0.625	0.592
Dia 7	1.222	0.687	0.744	0.328	1.462	1.149	0.575	0.597
Dia 8	0.409	1.133	0.322	0.430	**3.497**	0.789	0.803	0.623
Máximos	1.222	1.133	0.744	**3.141**	**3.497**	1.149	1.230	2.271

5.3.2. ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Antes de mais é necessário referir que no espectro FFT a frequência na qual ocorre o valor máximo da vibração é a chamada frequência dominante e corresponde à máxima amplitude da componente

(sinusoidal) do sinal de vibração no tempo (NP 2074, 2015). A frequência dominante é influenciada pela distância a que a fonte de vibração está do(s) edifício(s), ou seja, para pequenas distâncias são atingidas maiores amplitudes e maiores frequências e o oposto acontece para grandes distâncias. Outros fatores de influência são o meio de transmissão e o estado de conservação do edifício. Recorde-se que, para o tratamento do sinal foi utilizado um filtro passa-alto de 1 Hz e um passa-baixo de 80 Hz. Para além disso, é necessário referir que a mudança de domínios foi realizada com a variável aceleração.

Analisando o sinal registado correspondente à velocidade máxima atingida no Acc_3 (Figura 90a), observa-se um pico com uma ordem de grandeza cerca de 10 vezes superior ao restante sinal. Contrariamente ao que seria de esperar, no acelerómetro colocado no azulejo (Acc_4) este impacto não foi captado (Figura 90b). Ainda assim, observou-se o espectro de Fourier de ambos os sinais e, apesar de no Acc_3 existir uma gama de frequências dominantes mais concentrada entre 15 e 17 Hz, as frequências mais elevadas atingidas em ambos os acelerómetros ocorreram particamente no mesmo intervalos de valores – 15 a 20 Hz.

Posto isto, foi verificado nos documentos normativos entre que gama de frequências se situava o intervalo obtido anteriormente com vista a obter o limite para a velocidade de vibração das partículas. Na norma alemã DIN 4150-3 (1999), o intervalo de frequências situa-se na gama de 10 a 50 Hz. Assim, para edifícios na categoria de "residenciais" o limite sugerido pela norma para a velocidade de vibração das partículas é entre 5 e 15 mm/s. Relativamente à norma britânica BS 7385-2 (1993), para frequências entre 15 e 40 Hz os níveis de velocidade propostos vão desde 20 a 50 mm/s. Por fim, no que se refere à norma NP 2074 (2015) os valores das frequências obtidas localizam-se no intervalo de 10 a 40 Hz pelo que o limite é de 6 mm/s.

Mediante o exposto, o limite de velocidade de 3 mm/s, assumido durante o tratamento prévio para o acelerómetro Acc_3, pode ser alargado para 5 mm/s.

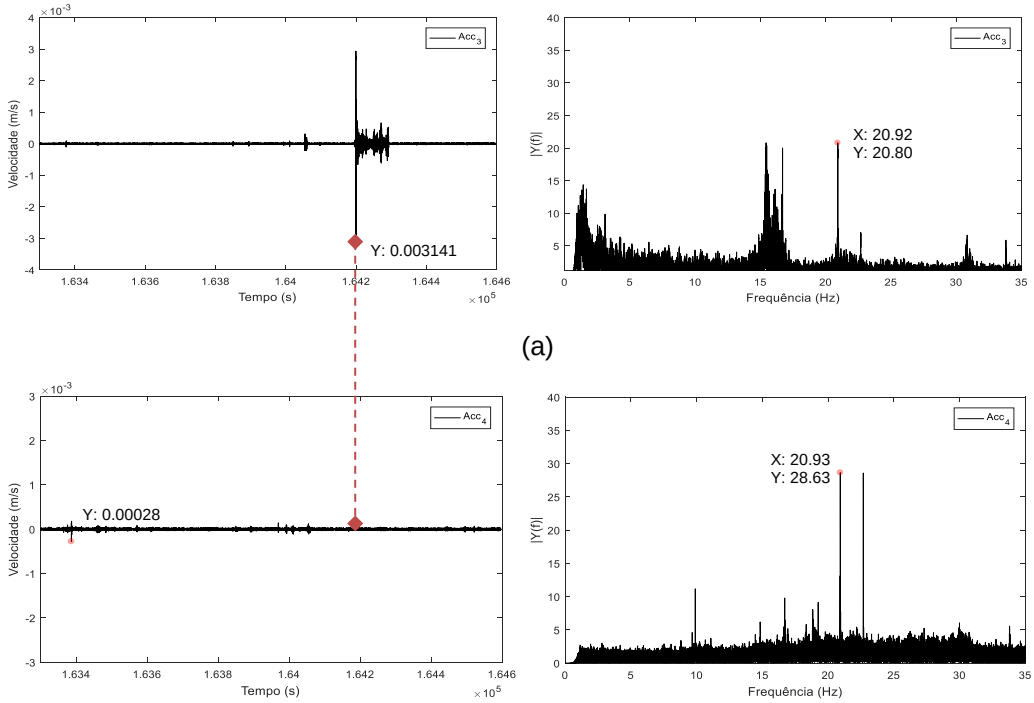


Figura 90 - Comparação do sinal no domínio do tempo e respetivo espectro de Fourier do acelerómetro Acc_3 e Acc_4

Relativamente aos valores máximos atingidos no acelerómetro Acc_4, os espectros apresentam um nível de ruído mais elevado, pelo que a leitura dos mesmos foi dificultada. O espectro de Fourier relativo ao registo com velocidade de 2,14 mm/s foi um caso em que não foi possível efetuar a leitura. Por outro lado, no que diz respeito aos espectros correspondentes às velocidades de 3,47 mm/s e 3,50 mm/s, as frequências dominantes encontram-se na gama dos 20 Hz (figuras 91 e 92). Segundo as normas, e uma vez que os azulejos foram inseridos na classe estrutural "sensível", para as frequências obtidas o limite de 1,5 mm/s admitido na "pré-análise" aumenta para 3 mm/s. Assim sendo, em duas ocasiões foi ultrapassada a velocidade máxima das partículas.

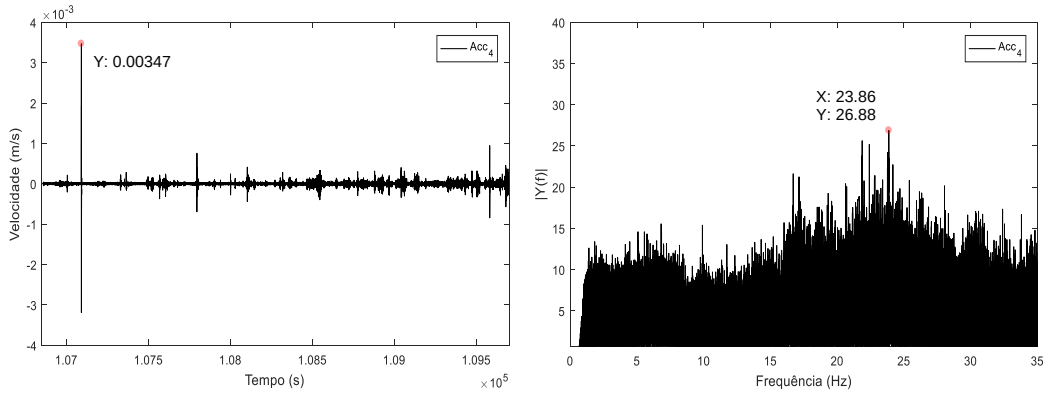


Figura 91 - Espectro de Fourier do acelerómetro Acc_4 para uma velocidade de pico de 3,47 mm/s

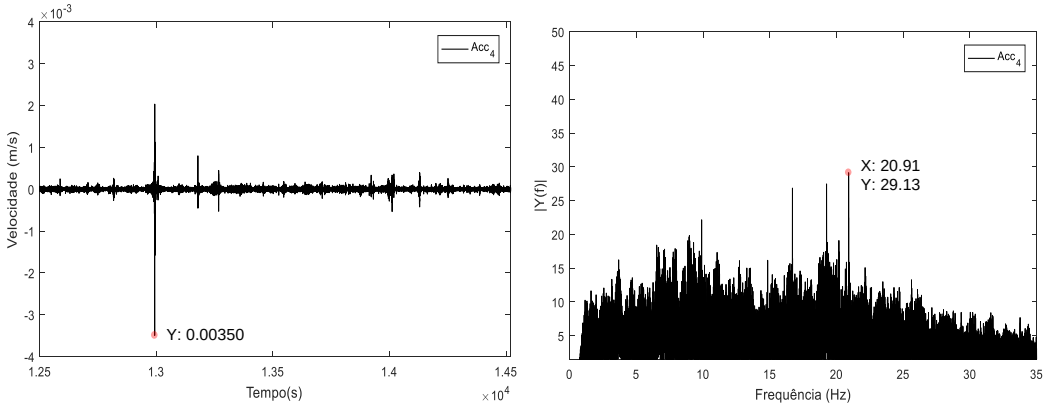


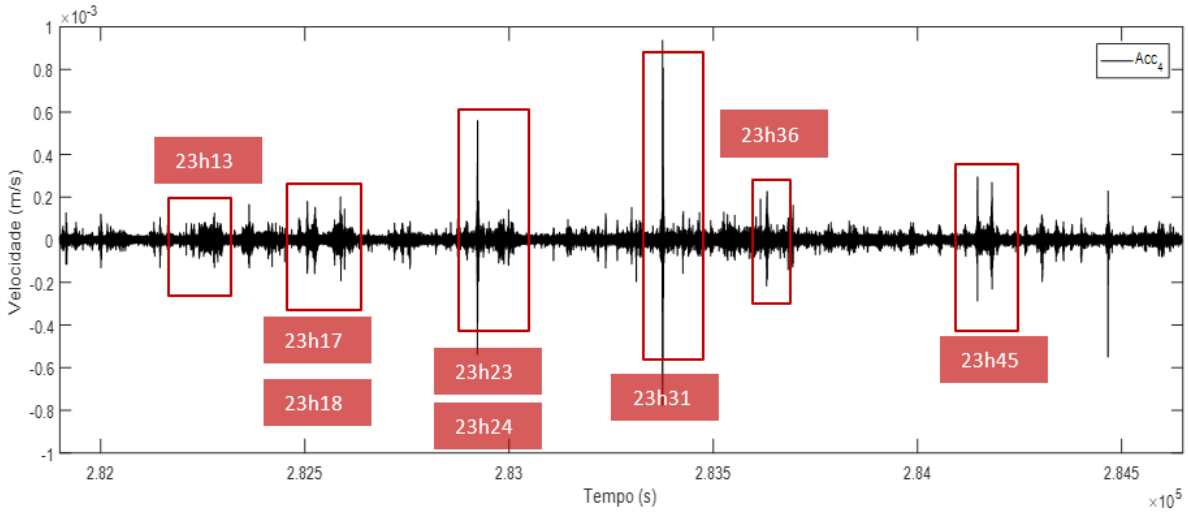
Figura 92 - Espectro de Fourier do acelerómetro Acc_4 para uma velocidade de pico de 3,50 mm/s

5.3.2.1. COMPARAÇÃO DO REGISTO DO SINAL COM A PASSAGEM DE VEÍCULOS PESADOS

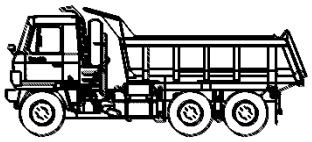
Para serem tiradas conclusões mais sustentadas, achou-se apropriado efetuar uma comparação de um registo do sinal com a passagem do tráfego, a fim de perceber se os veículos mais pesados estariam associados às velocidades de vibração mais elevadas. Em virtude de, apenas ter sido possível ter acesso a uma monitorização da circulação viária de algumas horas do dia 4 e do dia 7, escolheu-se para análise o sinal da última hora do dia 7 no acelerómetro Acc_4. Esta escolha deveu-se ao facto de ser uma hora em que o tráfego de veículo ligeiros é substancialmente menor, tal como o número de pessoas na via. Consequentemente, as perturbações provocadas pelos veículos pesados são mais percetíveis.

Durante o acesso à monitorização dos veículos, disponibilizada pela Câmara do Porto, registou-se o tipo de veículo pesado que passava na rua Fernandes Tomás, se o veículo parava ou não no semáforo existente e se ia na via da direita ou da esquerda (sentido oeste). Na figura 93, é apresentado o registo do sinal juntamente com a tabela correspondente aos dados registados na visita à Câmara do Porto. Como se pode observar as maiores perturbações correspondem à passagem de veículos pesados, principalmente se circularem pela via mais próxima da capela (direita) e se não efetuarem paragem no semáforo.

Relativamente à passagem do metro, foi possível concluir que as vibrações induzidas pelo mesmo não têm influência no surgimento de danos na estrutura uma vez não foi possível identificar a passagem do mesmo a partir da análise dos registos de vibrações (mesmo sabendo os horários da sua passagem).



	Hora	Veículo	Parou/Não parou	Via da estrada
Dia 7	23h13	Camião de carga	Parou	Esquerda
	23h17	Autocarro	Parou	Direita
	23h18	Autocarro	Não parou	Direita
	23h23	Autocarro	Não parou	Direita
	23h24	Autocarro	Não parou	Direita
	23h31	Autocarro	Não parou	Direita
	23h36	Autocarro	Não parou	Direita
	23h45	Autocarro	Parou	Esquerda


Camião de carga


Autocarro

Figura 93 - Registo do sinal e respetiva passagem de veículos pesados

5.4. NOTAS FINAIS

Após se efetuar o tratamento das acelerações recolhidos na Capela das Almas com recurso ao *software* MATLAB importa reter a seguinte informação:

- Os registos obtidos no acelerómetro Acc_0 e Acc_7, posicionados em diferentes fachadas, apesar de indicarem um comportamento dinâmico semelhante entre as duas paredes, não permitem concluir se a fachada principal e a fachada direita estão embricadas até à cobertura, uma vez que a solicitação dinâmica (ambiental) utilizada é de baixa intensidade, podendo assim não ser suficiente para evidenciar um comportamento diferenciado entre as duas paredes.
- O acelerómetro Acc_2, apesar de colocado num pano de alvenaria de granito com menor espessura e, consequente menor rigidez, apresenta um registo de sinal muito semelhante ao registado no Acc_3.
- Quanto ao Acc_4, colocado sobre o azulejo, apresenta um registo com alguns picos de vibração comparativamente com o Acc_3, colocado diretamente na alvenaria de granito. Este aspeto indica que o tardoz do azulejo poderá não estar completamente aderente à argamassa, podendo ocorrer amplificação do sinal.
- A velocidade de pico atingida na maioria dos acelerómetros cumpre os documentos normativos que foram tidos em conta – DIN 4150-3 (1999), BS 7385-2 (1993) e NP 2074 (2015). Contudo no acelerómetro colocado no azulejo (Acc_4), após observação dos espectros de Fourier relativos às velocidades máximas atingidas, constatou-se que o limite de velocidade é de 3 mm/s, pelo que dois dos valores registados ultrapassaram ligeiramente essa velocidade. Como não foi possível obter monitorização do tráfego rodoviário para os dias em que ocorreram esses valores não se conseguiu verificar se esses picos corresponderam à passagem de um veículo pesado na rua Fernandes Tomás. Contudo, nos dias em que foi possível a monitorização verificou-se que aquando da passagem de veículos pesados (autocarros, camiões de carga,..) ocorreram maiores perturbações no sinal, nomeadamente quando o veículo não parava no semáforo existente nessa rua e quando circula na via mais próxima da capela.

6
CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo das vibrações induzidas por veículos pesados e pelo metro subterrâneo (metro do Porto) na Capela das Almas, situada no centro histórico da cidade do Porto. Assim sendo, foi efetuado um plano de monitorização com vista a analisar os níveis de vibração em vários elementos da capela, em particular nos azulejos exteriores da fachada direita, de modo a avaliar se o constante destacamento/empolamento poderia estar associado ao facto de estarem sujeitos a níveis de vibrações muito elevados.

Numa fase inicial, além de recolhida toda a informação relativa à constituição da capela e intervenções registadas até à data na mesma, foi efetuada uma visita técnica. Esta visita permitiu fazer um levantamento aos danos existentes na capela e efetuar comparações com a descrição dos danos anteriores e permitiu definir os locais mais adequados para instalar todo o sistema de monitorização das vibrações. Após a análise da informação recolhida importa reter:

- Pelos registos existentes, antes da construção da estação de metro do Bolhão, os painéis azulejares das fachadas principal e lateral direita da capela só foram intervencionados em 1982 após a sua colocação.
- Foi feita uma campanha de inspeção ao estado destes painéis antes da execução da obra do metro do Bolhão, onde foram identificadas diversas patologias e onde foram tomadas medidas preventivas para evitar a sua queda, como o faceamento geral das fachadas.
- Aquando da construção da estação do metro do Bolhão, que se situa sob a capela, foi implementado um plano de instrumentação pela Metro do Porto na zona da estação e na própria capela. Não foi possível aceder aos relatórios de monitorização, pelo que não se sabe qual o nível de vibrações a que a estrutura na capela esteve submetida aquando da construção da estação, nem quais os movimentos gerados na parede lateral (os que já existiam, os que surgiram de novo e os que foram agravados).
- Na conservação e restauro dos painéis azulejares foram usadas argamassas de cal aérea hidratada, não se conhecendo ainda a espessura da camada de assentamento dos azulejos. Nos azulejos que foram consolidados *in situ* foi usada uma calda consolidante.

Após a visita à capela, a análise do danos observados na Capela das Almas não permitiu obter uma relação direta entre estes e o destacamento/empolamento que se verifica com maior incidência na fachada lateral direita na zona da capela-mor. No entanto, registou-se o destacamento de paredes entre diferentes fachadas, admitindo-se que a parede lateral direita poderá vibrar de forma independente das restantes paredes. Esta parede, na zona da nave, encontra-se travada em altura ao nível da abóbada, sendo que, ao haver descompressão ao nível do arco-cruzeiro e naturalmente da abóbada, possam ocorrer alguns impulsos horizontais no topo da parede não equilibrados. De referir que o apodrecimento do

frechal e a existência de uma escora inclinada a apoiar diretamente no topo da parede no desvão da cobertura, são fatores negativos no comportamento estrutural da cobertura e da parede. Na zona da capela-mor, onde se verifica o continuado destacamento/empolamento dos azulejos não foi possível verificar a constituição da abóbada a nível estrutural, avaliar o estado do frechal e ,consequentemente, o travamento da estrutura da cobertura e das paredes entre si.

Relativamente ao lado exterior da capela, na esquina da parede lateral direita com a parede fundeira verificou-se que o escoamento do tubo de queda das águas pluviais é feito diretamente para o chão dando origem à infiltração da águas. O empolamento/destacamento observado nos azulejos induz a existência de compressão entre faces de azulejos, podendo este fenómeno não estar dependente unicamente das vibrações.

Numa segunda fase do trabalho, com vista a efetuar o plano de monitorização das vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário e ferroviário nas imediações da capela, foram estudados vários acelerómetros no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP de modo a escolher o mais adequado para registar os níveis de vibração nos azulejos da capela sem que a sua fixação provocasse danos nos mesmos. Após a escolha e colocação em obra de todo o sistema de monitorização, foi efetuada a recolha de dados durante alguns dias e posteriormente efetuado o tratamento dos mesmos com recurso ao *software* MATLAB.

Da análise dos dados recolhidos, verificou-se que a fachada principal e fachada lateral direita apresentaram um comportamento dinâmico semelhante. Contudo, não é possível concluir se a fachada principal e a fachada direita estão embricadas até à cobertura, uma vez que a solicitação dinâmica (ambiental) utilizada é de baixa intensidade, podendo assim não ser suficiente para evidenciar um comportamento diferenciado entre as duas paredes.

No que diz respeito às velocidades de vibração das partículas atingidas nos acelerómetros, na sua maioria cumpriram os documentos normativos que foram tidos em conta, isto é DIN 4150-3 (1999), BS 7385-2 (1993) e NP 2074 (2015). No entanto, no acelerómetro colocado no azulejo (Acc_4), após observação do espectro de Fourier relativos às velocidades máximas atingidas, constatou-se que o limite de velocidade é de 3 mm/s, pelo que dois dos valores registados ultrapassaram ligeiramente essa velocidade. Como não foi possível obter monitorização do tráfego rodoviário para os dias em que ocorreram esses valores não se conseguiu verificar se esses picos corresponderam à passagem de um veículo pesado na rua Fernandes Tomás. Nos dias em que foi possível a monitorização verificou-se que aquando da passagem de veículos pesados (autocarros, camiões de carga,..) ocorreram maiores perturbações no sinal adquirido, nomeadamente quando o veículo não parava no semáforo existente nessa rua e quando circula na via mais próxima da capela .

Relativamente à passagem do metro, foi possível concluir que as vibrações induzidas pelo mesmo não têm influência no surgimento de danos na estrutura.

6.1. RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS E TRABALHOS FUTUROS

Uma vez que não se conseguiu concluir se a fachada principal e a fachada lateral direita estão embricadas até à cobertura, recomenda-se a realização de ensaios dinâmicos com um martelo de impulso. Caso seja confirmado que o seu funcionamento é independente, efetuar pregagem nos cunhais para que as duas paredes funcionem como um conjunto. Além da monitorização das fachadas, é recomendada a monitorização do arco-cruzeiro para verificar se a descompressão verificada está estabilizada.

Na zona da capela-mor, onde se verifica o continuado destacamento/empolamento dos azulejos não foi possível verificar a constituição da abóbada a nível estrutural, avaliar o estado do frechal e,

consequentemente, o travamento da estrutura da cobertura e das paredes entre si, pelo que se sugere uma visita técnica à mesma. A estrutura de cobertura da nave deve ser restaurada, nomeadamente o frechal e as madres. As escoras que dão apoio à madre 3 e a escora que se apoia na fachada lateral direita devem ser retiradas. Sugere-se também uma visita à cripta.

Relativamente ao lado exterior da capela, na esquina da parede lateral direita, o escoamento do tubo de queda das águas pluviais é feito diretamente para o chão, pelo que se deveria encaminhar estas águas para uma caixa de recolha. Por outro lado, a compressão/empolamento existente nos azulejos, poderá ter a ver com o envelhecimento das argamassas/problemas de aderência, infiltrações no suporte ou devido a dilatações térmicas, pelo que se sugere um estudo deste mau comportamento dos azulejos. Adicionalmente, refere-se que o cabeçote do sino deverá ser alvo de intervenção a curto prazo.

Para além destas recomendações técnicas, é importante referir que antes de ter sido feita a monitorização da capela, foram efetuadas obras no pavimento da rua Fernandes Tomás, uma vez que este continha bastantes irregularidades, nomeadamente na tampa de saneamento que se encontra a uma distância relativamente curta em relação à Capela das Almas. Devido à existência destas irregularidades, e do facto de estas se situarem a uma distância de cerca de 1 metro da fachada, seria possível que, aquando da passagem de veículos pesados pelas reentrâncias do pavimento, fossem induzidos níveis de vibrações mais elevados nos azulejos dos que os que foram registados durante este estudo. Com isto, caso o pavimento volte a ter um estado de degradação elevado, é recomendado voltar a efetuar um estudo vibratório na capela, de modo a que se possa concluir se são registados valores de velocidades mais elevados do que os que foram registados neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barros, M., Teixeira, R., Fonseca, V., Torres, V.H.C. (2002). *Estudo patrimonial de pormenor da frente de obra da estação. Capela das Almas - edifício 0515.* Arqueologia e património, Porto

Basekar, P., Vaghela, D., Katakiya, M., (2015). *Impact of traffic vibration on heritage structures.* International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, March 2015, Vol:3, nº 3 , p.6-15, Ahmedabad, Índia

Bernardo,P., Dinis da Gama,C. (2006). *Sugestões para melhoria da norma portuguesa de controle de vibrações em construções*. 10º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa

Bonterra PSOMAS (2014). *Noise and Vibration Impact Analysis: Paseo Colorado Redevelopment Project.* Pasadena, California

BS 6472-1 (2008). *Guide to Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings (1 Hz to 80*

Hz)

BS 7385-1 (1990). *Guide for measurement of vibrations and evaluations of their effects on buildings*

BS 7385-2 (1993). *Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide to damage levels from groundborne vibration.*

Carvalhal, F., Costa, C., Azevedo, F.(2008). *Elementos de sistemas e de análise e processamento de sinais*; LNEC

Chiostrini,S., Marradi,A., Vignoli,A. (1995). *Evaluation of traffic-induced vibrations in historic buildings: the case of 'Galleria Vasariana' in Florence.* Transactions on the Built Environment, Vol:15, p.69-76, Florence

Costa, A., Paupério, E., Costa, C.Q.M. (2013).Relatório de inspeção e diagnóstico: Capela das Almas, IC-FEUP

Crispino, M., D'Apuzzo, M. (2001). *Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building*. Journal of Sound and Vibration Vol:246, nº 2, p.319-335, Milano.

De Brito, L.A.P.F., Kamimura, Q., Dos Santos, A.P. (2015). *Influência da vibração gerada pelo tráfego ferroviário no meio urbano.* PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Jul./Dez 2015, Vol:5, nº 2, p.31-39, Campinas

Del Grosso, A.E., Basso, P.(2014). *Monitoring of vibrations for the protection of architectural heritage.* EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring. 8-11 Julho 2014, La Cité, Nantes, France

DIN 4150-2 (1999). *Structural vibration. Part 2: Human exposure to vibration in buildings*

DIN 4150-3 (1999). *Structural vibration. Part 3: Effects of vibration on structures*

Fonseca, V. (2007). Documento sem título. Arqueologia e Património, Porto

Gaspar, A. (2002). *Monitorização da Capela Santa Catarina ou Capela das Almas- Descrição dos instrumentos a colocar.* TRANSMETRO, Porto.

Hajek, J.J., Blaney, C.T., Hein, D.K (2006). *Mitigation of highway traffic-induced vibration*. Annual Conference of the Transportation Association - Session on Quiet Pavements: Reducing Noise and Vibration, 17-20 Setembro 2006, Charlottetown, Prince Edward Island, Canada

Hipólito, A.M., Torres, V.H.C. (2005a). *Monitorização da Capela das Almas: 2002 a 2004.* Arqueologia e património, Porto

Hipólito, A.M., Torres, V.H.C. (2005b). *Relatório intervenção de conservação e restauro da Capela das Almas.* Arqueologia e património, Porto

Hunaidi, O. (2000). *Traffic Vibrations in Buildings, Construction Technology*. National Research Council of Canada

ISO 2631-1 (1997). *Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Wholebody Vibration - Part 1: General Requirements*

ISO 2631-2 (2003). *Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration - Part 2:Continuous and Shock-induced Vibrations in Buildings (1 to 80 Hz).*

ISO 4866 (2010). Mechanical Vibration and Shock - Vibration of Buildings - Guidelines for the Measurement of Vibrations and Evaluation of Their Effects on Buildings.

Ma, M., Markine, V.L., Wei-ning,L., Yang, Y. Feng,Z.(2011). *Metro train-induced vibrations on historic buildings in Chengdu, China*. Journal of Zhejiang University- Science A:Applied Physics and Engineering, Vol:12, p.782-793, Zhejiang

Melo, R.M.B. (2006). *Exposição ocupacional a vibrações transmitidas ao corpo inteiro: fatores condicionantes na condução de autocarros urbanos.* Dissertação de doutoramento. Faculdade de motricidade humana

Morais,V., Vieira,C. (2006). *MATLAB 7 e 6: Curso completo.* FCA – Editora de informática: Lisboa

Moutinho, C. (2007). *Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil.* Dissertação de doutoramento, FEUP

NP 2074 (2015). *Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas*

Nunes,L., Alves da Costa, P.(2006). *Controlo de vibrações provocadas pela utilização de explosivos na indústria extrativa próximo de áreas urbanas: Análise da principais normas europeias.* VII Congresso Nacional de Geologia, Estremoz

Oppenheim, A. V., Schafer, R.W. (2014). *Discrete-time signal processing.*Pearson Education Limited

Roque da Silva, A. (2001). *Relatório dos trabalhos de conservação e restauro do património azulejar – Capela das Almas.* Restauro Con'Arte L.da, Porto

Santos, J., Robalo, R., Lopes, P. (2006). *Monitorização automatizada em obras geotécnicas. Monitorização em tempo real da estação do Bolhão e da rede de metro ligeiro do Porto.* Tecnasol FGE - Fundações e Geotecnia S.A.

Sarsby, R.W. (2000). *Environmental Geotechnics.* Thomas Telford Ltd., Londres

Selcuk, I.A., Cubukcu, K.M. (2015). *Modeling traffic-induced, in-dwelling vibration using urban design and planning variables.* Journal of Architectural and Planning Research, Dezembro 2015, Vol:32, nº4 , p.307, Locke Science Publishing Company, Inc., Chicago

Sequeira, C. (2013).*Sensores para medições de vibrações mecânicas-Acelerómetros*. Revista Manutenções, Vol:116, p.4-6

Silva,H., Martins,T.,Ferreira,A. (2012).*Relatório de Inspeção e Reabilitação da Capela das Almas.* Relatório de Estágio, ISEP

Studer, J ; Suesstrunk, A. (1981). *Swiss standard for vibrational damage to buildings*. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 307-312, Zurich

Velosa, A.L.L., Ferreira,L.M., Ferreira,M.I.M. (2012) *Manual de Materiais e Técnicas Tradicionais de Assentamento de Azulejos de Fachada*. Atelier de Conservação e Restauro do Azulejo (ACRA), Câmara Municipal de Ovar

Endereços

http://www.patrimoniocultural.gov.pt/pt/patrimonio/patrimonio-imovel/pesquisa-do-patrimonio/classificado-ou-em-vias-de-classificacao/geral/view/74379/ . (8 março 2018).

http://www.pcb.com/Products/model/393A03. (22 maio 2018).

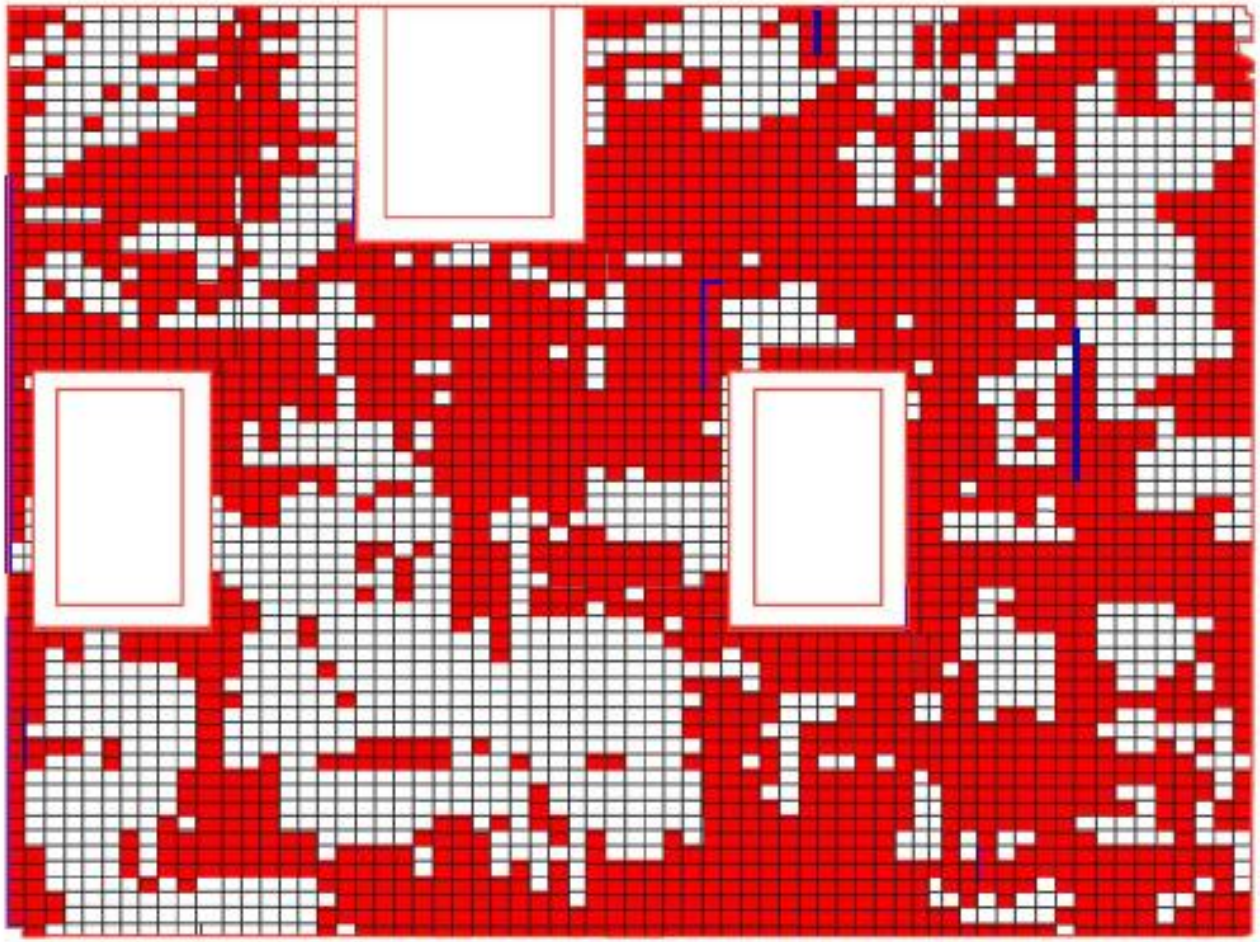
https://www.pcb.com/Products.aspx?m=353B03. (22 maio 2018).

http://www.pcb.com/Products/model/393B12. (22 maio 2018) .

ANEXOS

A.1

LEVANTAMENTO DE DANOS NOS AZULEJOS DESDE SETEMBRO DE 2002 A DEZEMBRO DE 2004



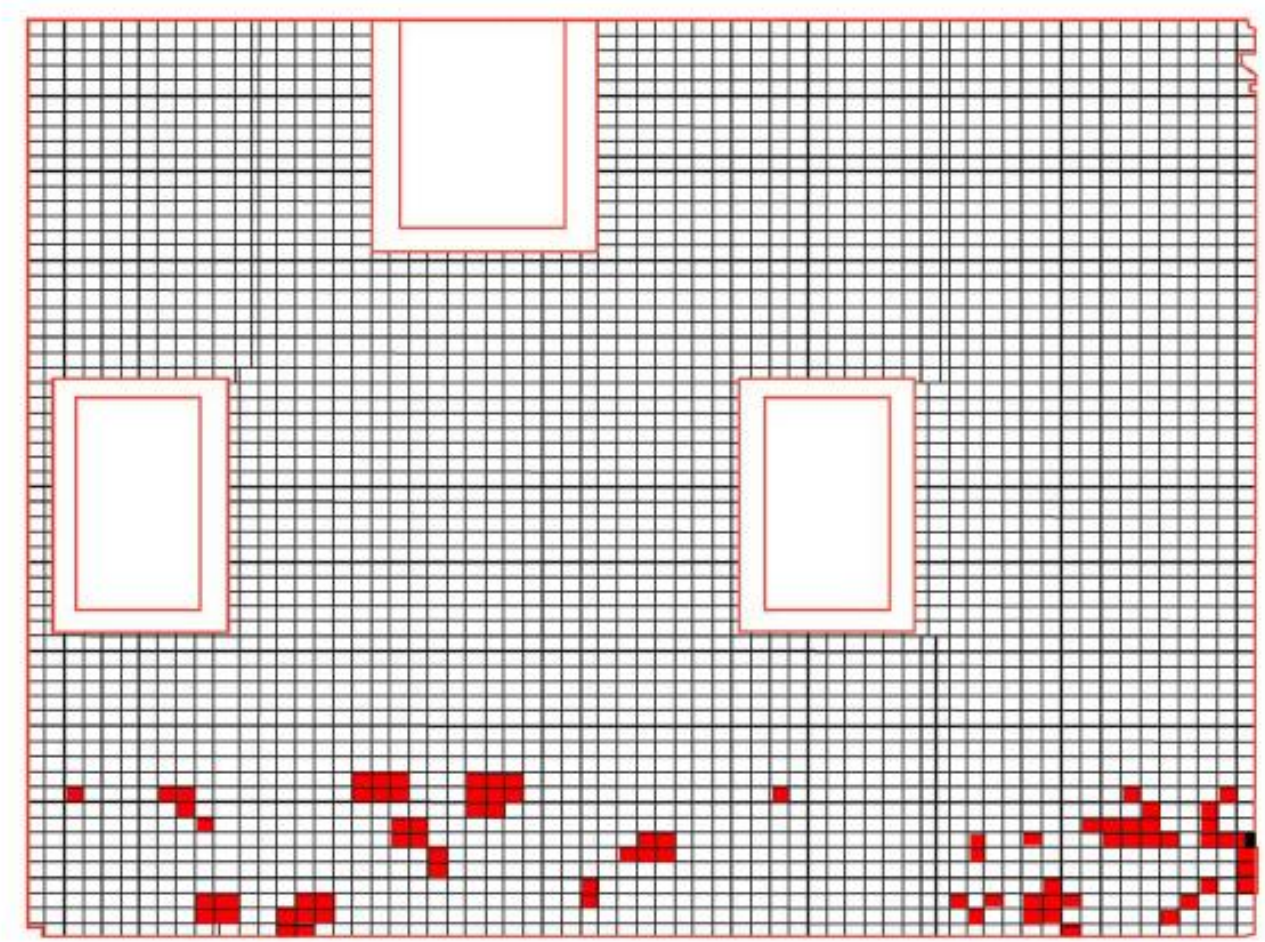
Capela das Almas

1º LEVANTAMENTO – REFERÊNCIA

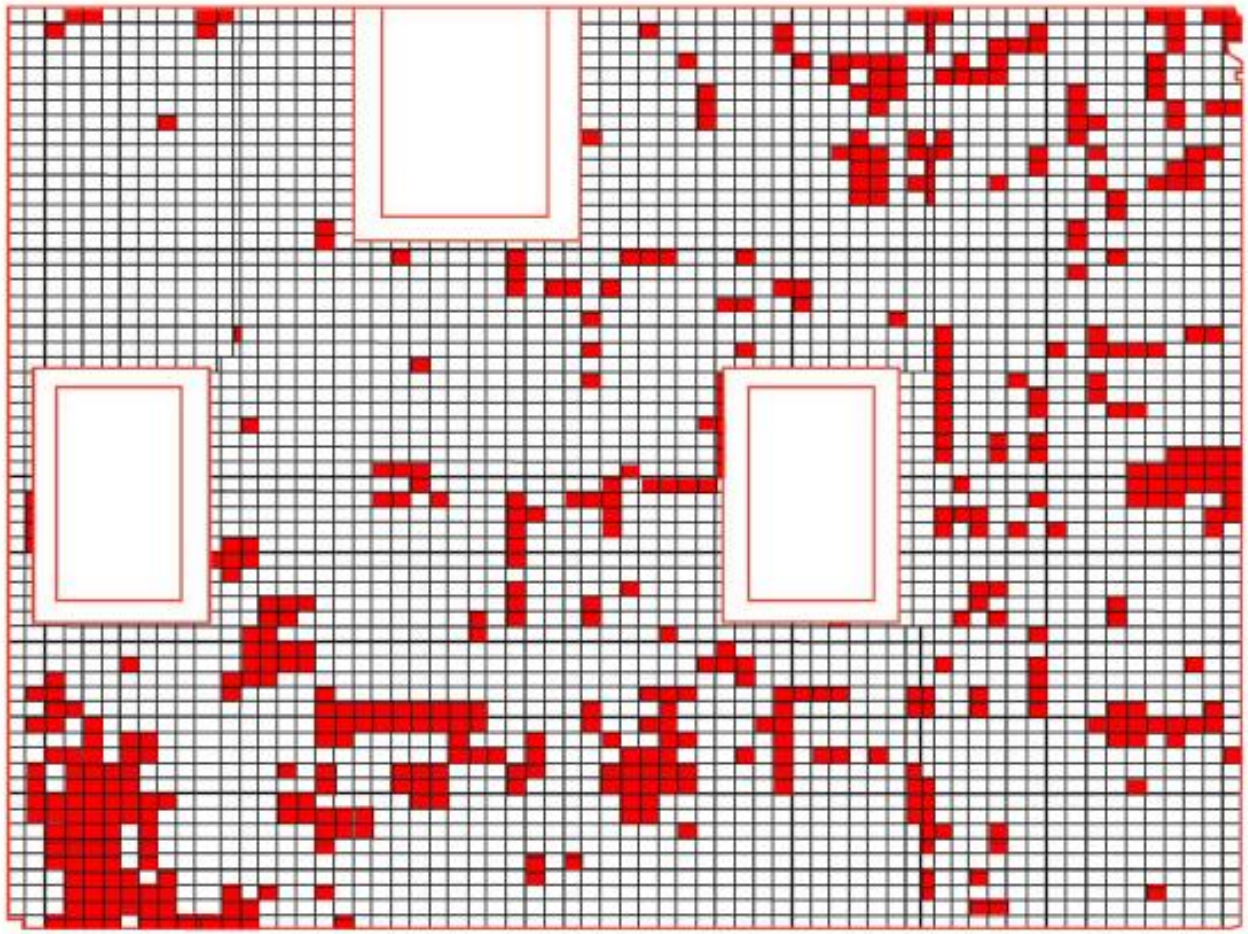
- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Capela-Mor

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas	
2º LEVANTAMENTO – PARCIAL Azulejos com Patologia Azulejos sem Patologia Azulejos Parcialmente Destacados Azulejos Destacados Fissuras Zonas Inacessíveis	Capela-Mor arqueologia & património ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



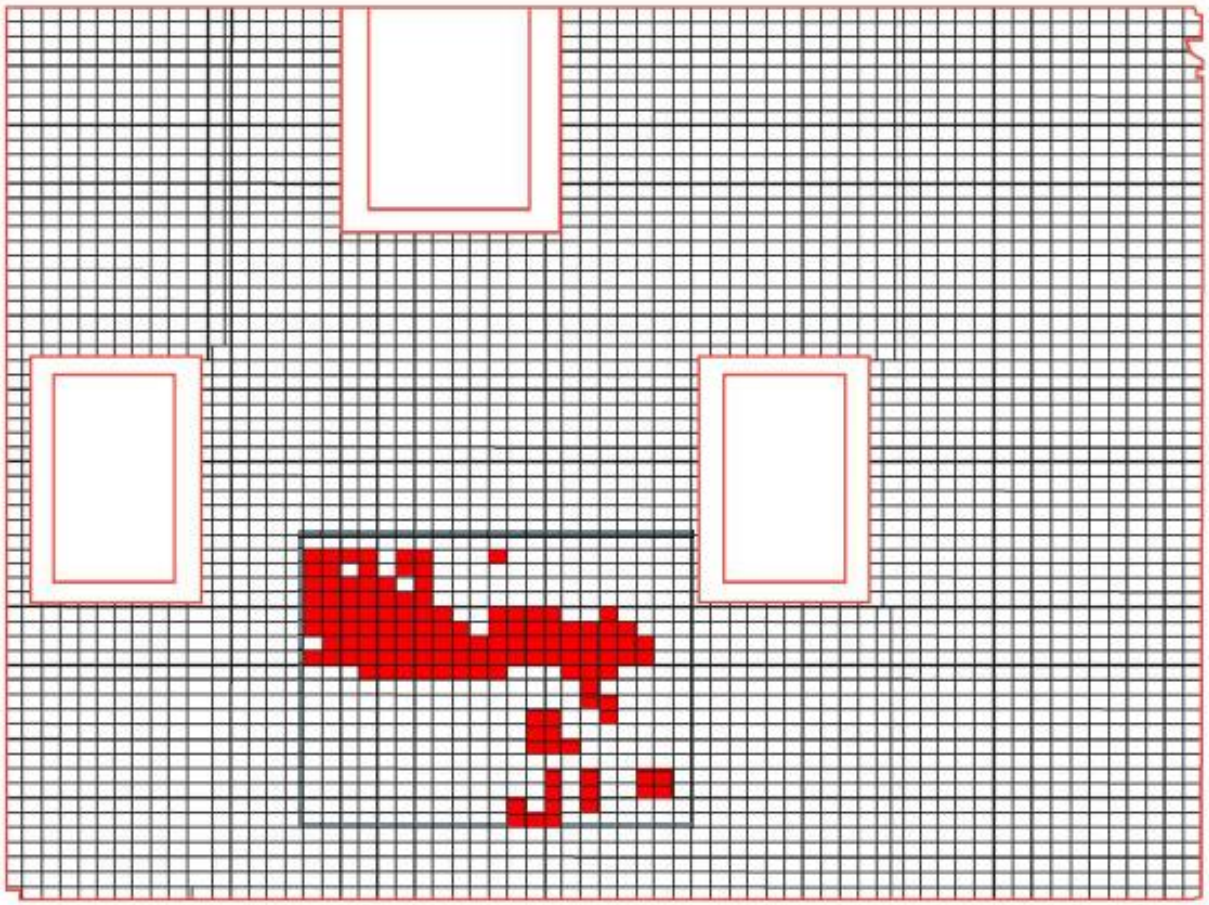
Capela das Almas

3º LEVANTAMENTO

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Capela-Mor

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



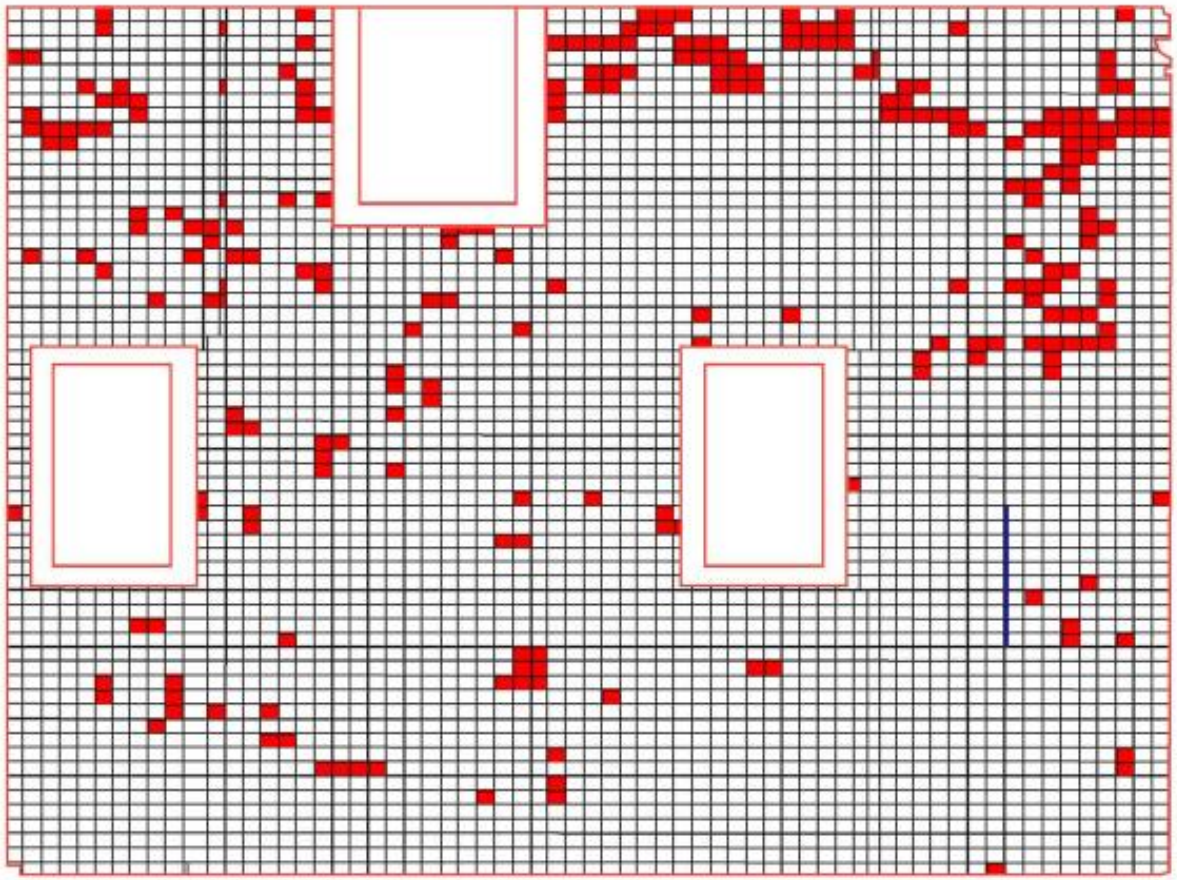
Capela das Almas

4º LEVANTAMENTO

Capela-Mor

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



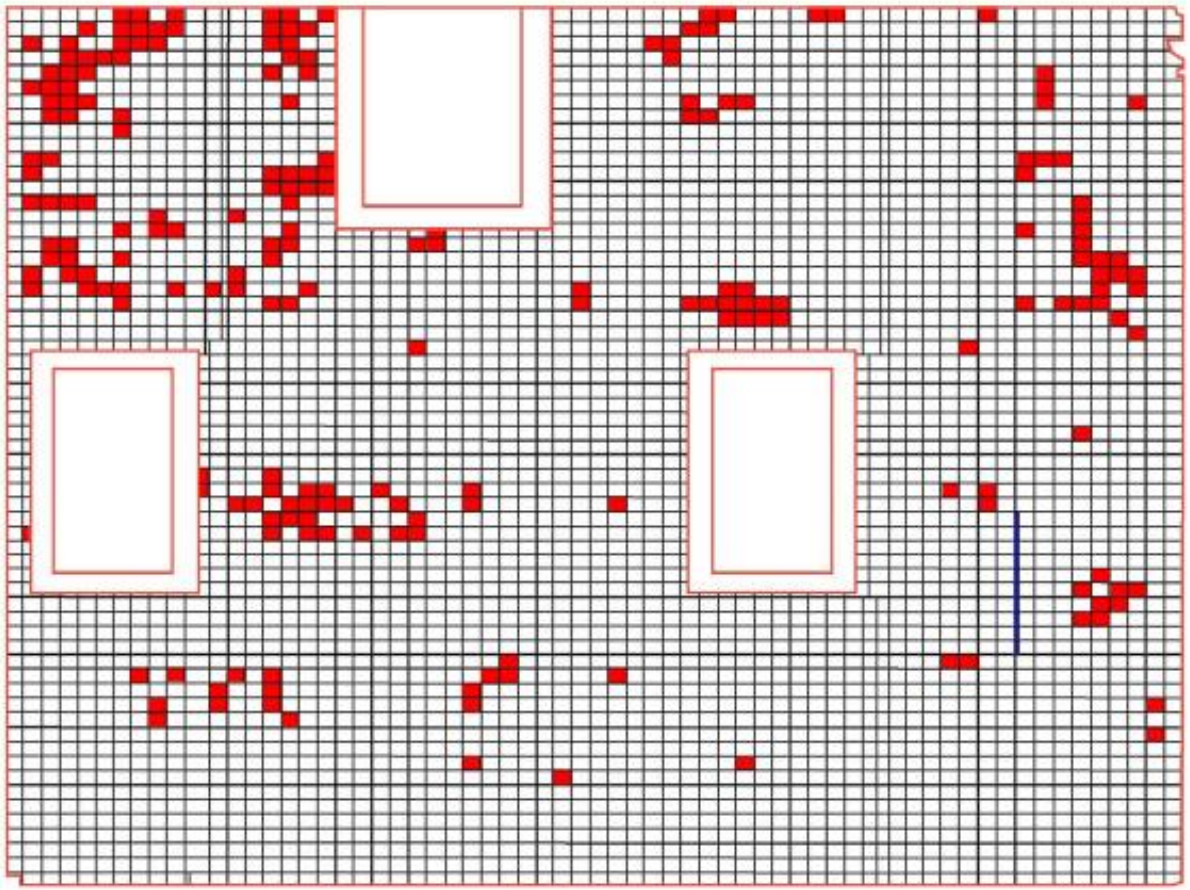
Capela das Almas

5º LEVANTAMENTO

Capela-Mor

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



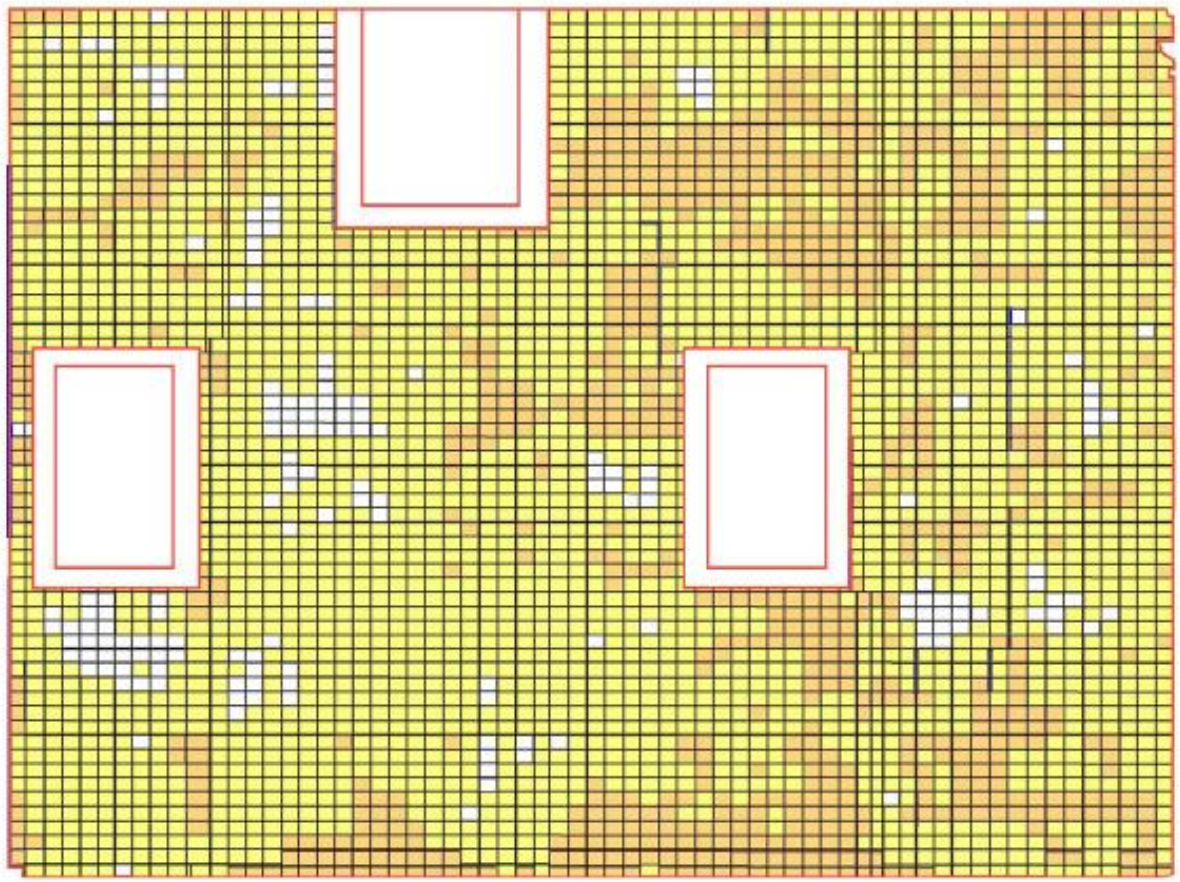
Capela das Almas

6º LEVANTAMENTO

Capela-Mor

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



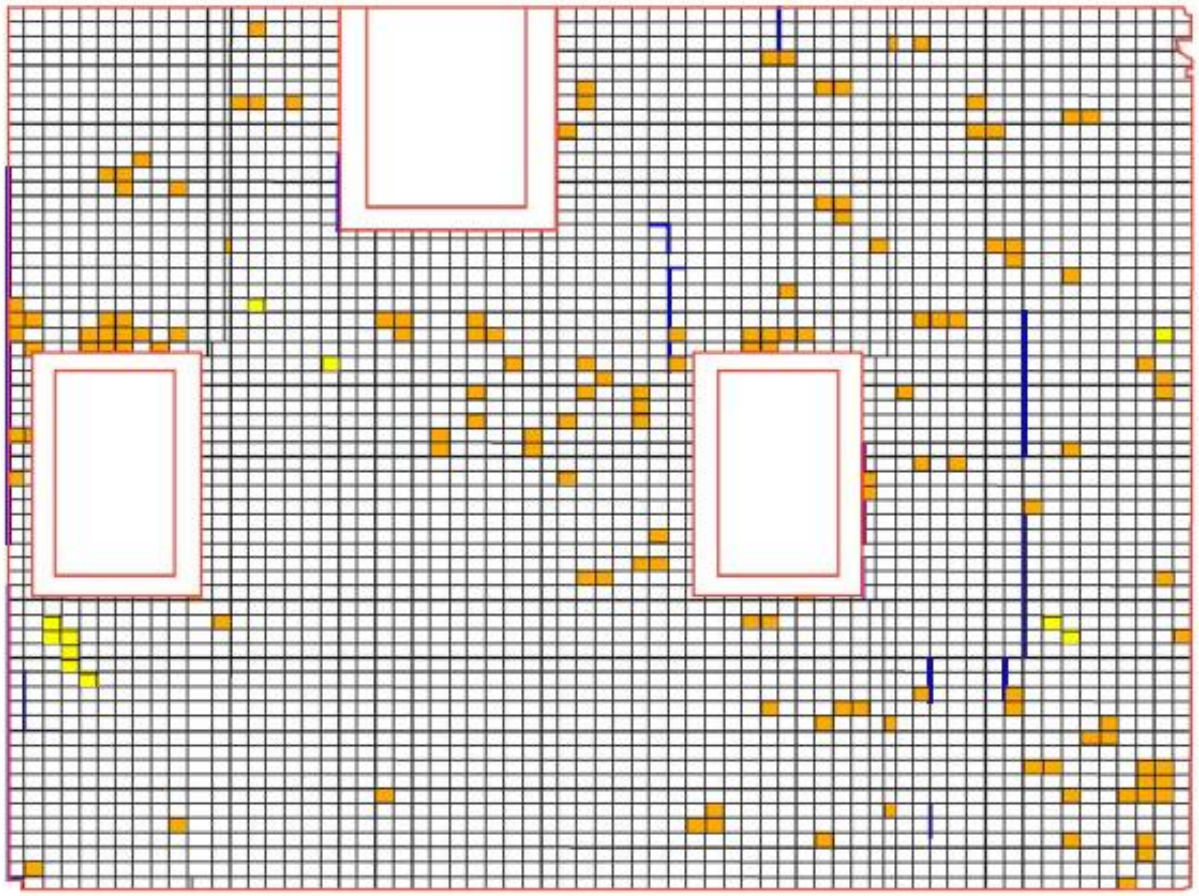
Capela das Almas

7º LEVANTAMENTO

Capela-Mor

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



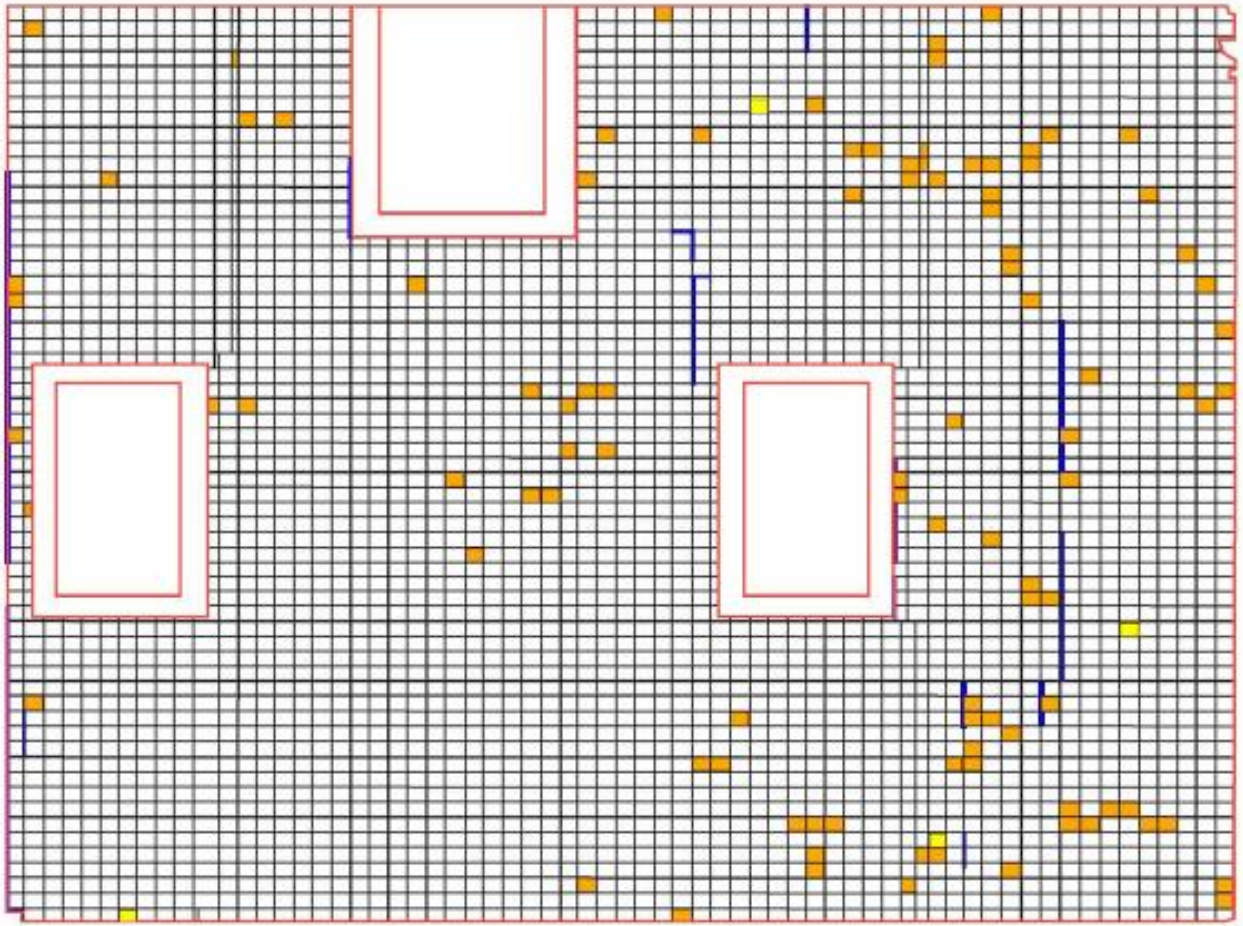
Capela das Almas

8º LEVANTAMENTO

Capela-Mor

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



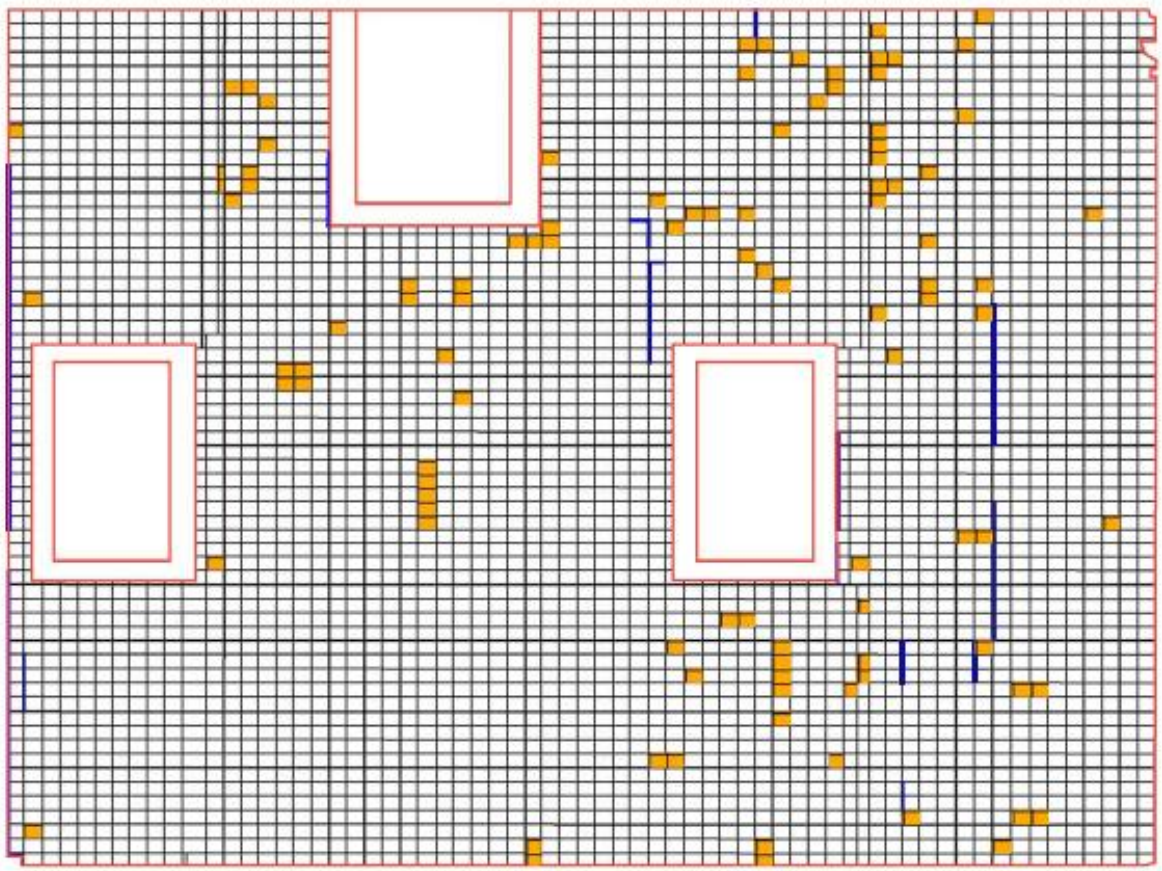
Capela das Almas

9º LEVANTAMENTO

Capela-Mor

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

10º LEVANTAMENTO

Capela-Mor

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

arqueologia & património
ricardo teixeira & vítor fonseca - arqueologia lda



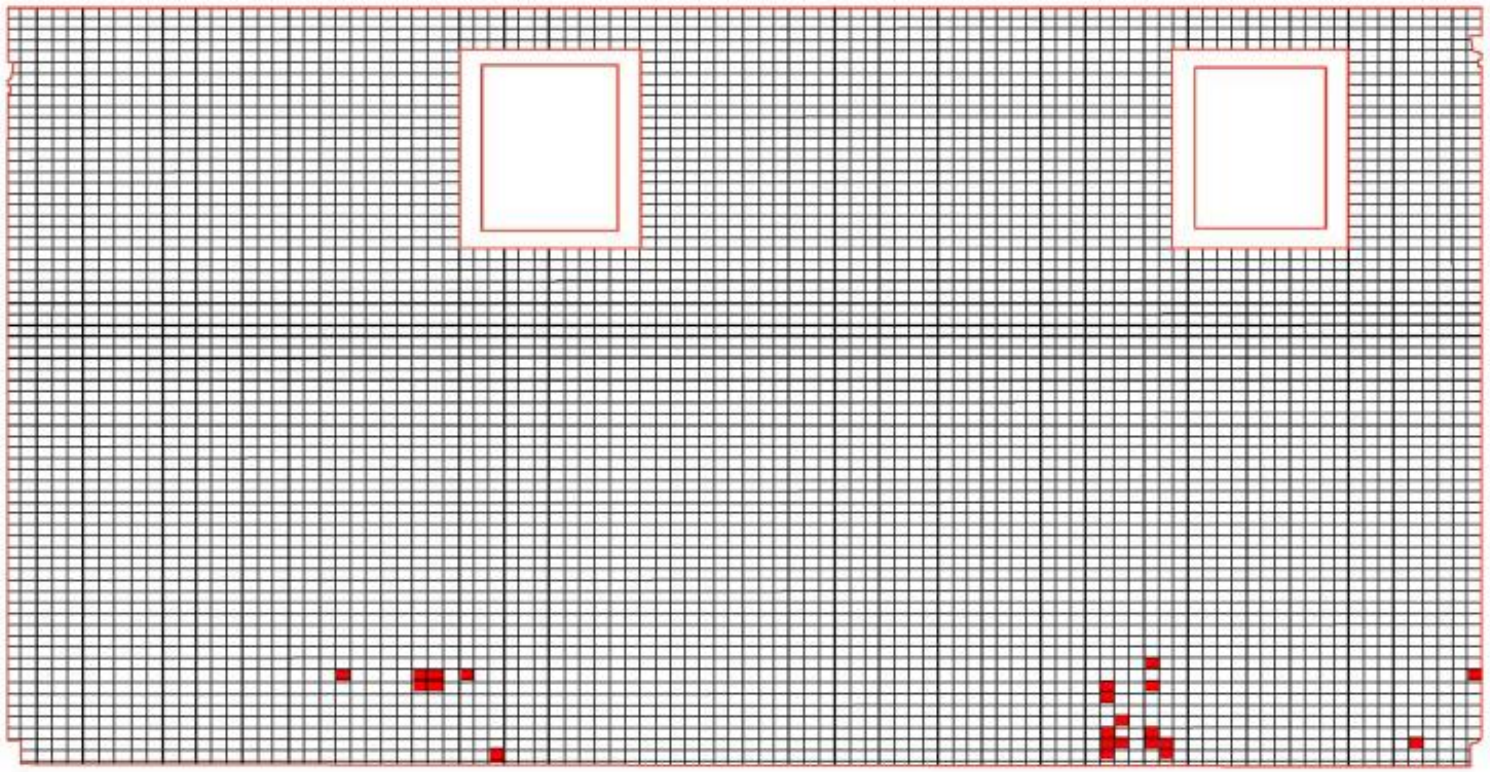
Capela das Almas

1º LEVANTAMENTO - REFERÊNCIA

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Nave

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



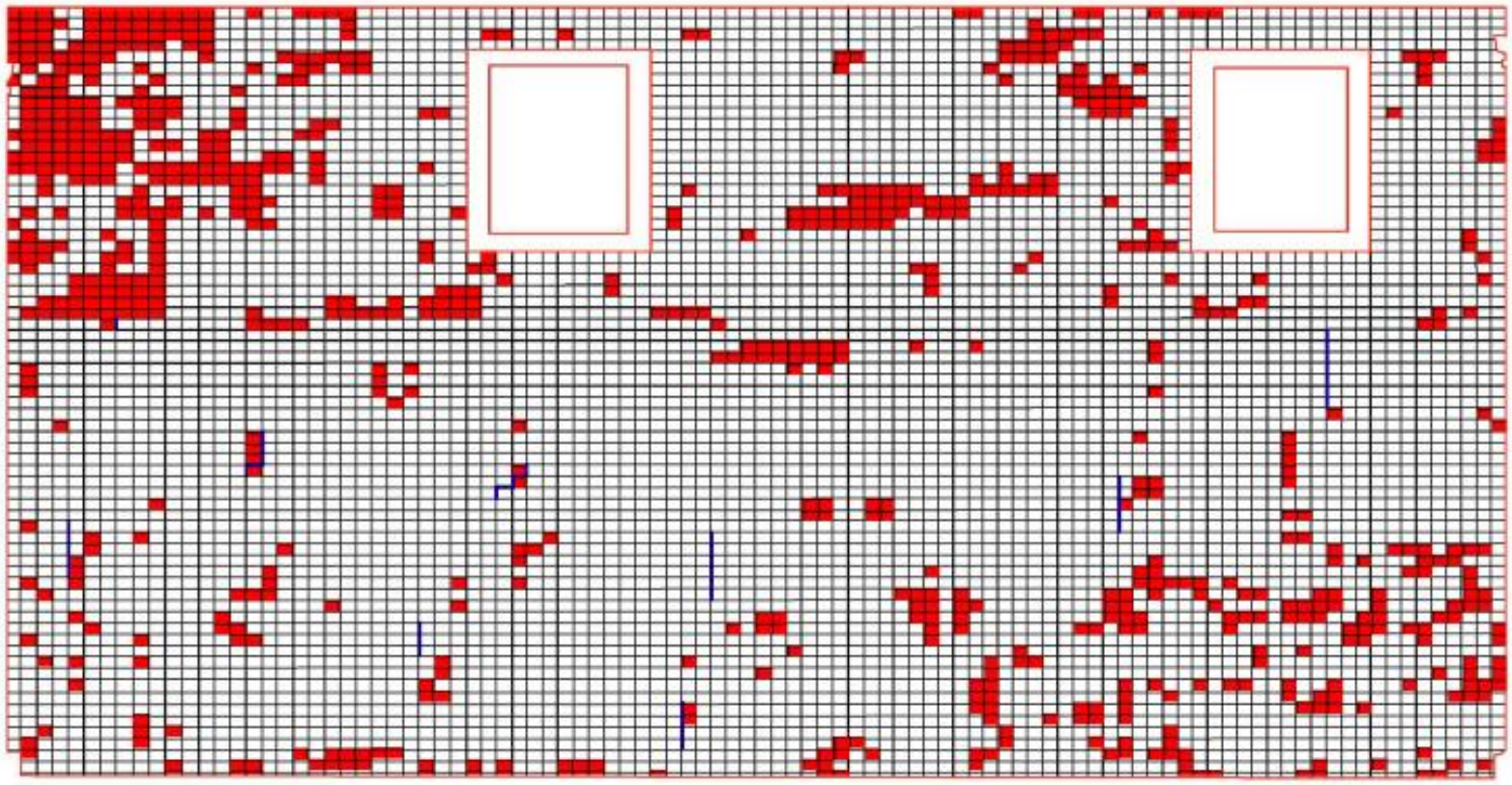
Capela das Almas

2º LEVANTAMENTO - PARCIAL

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Nave

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



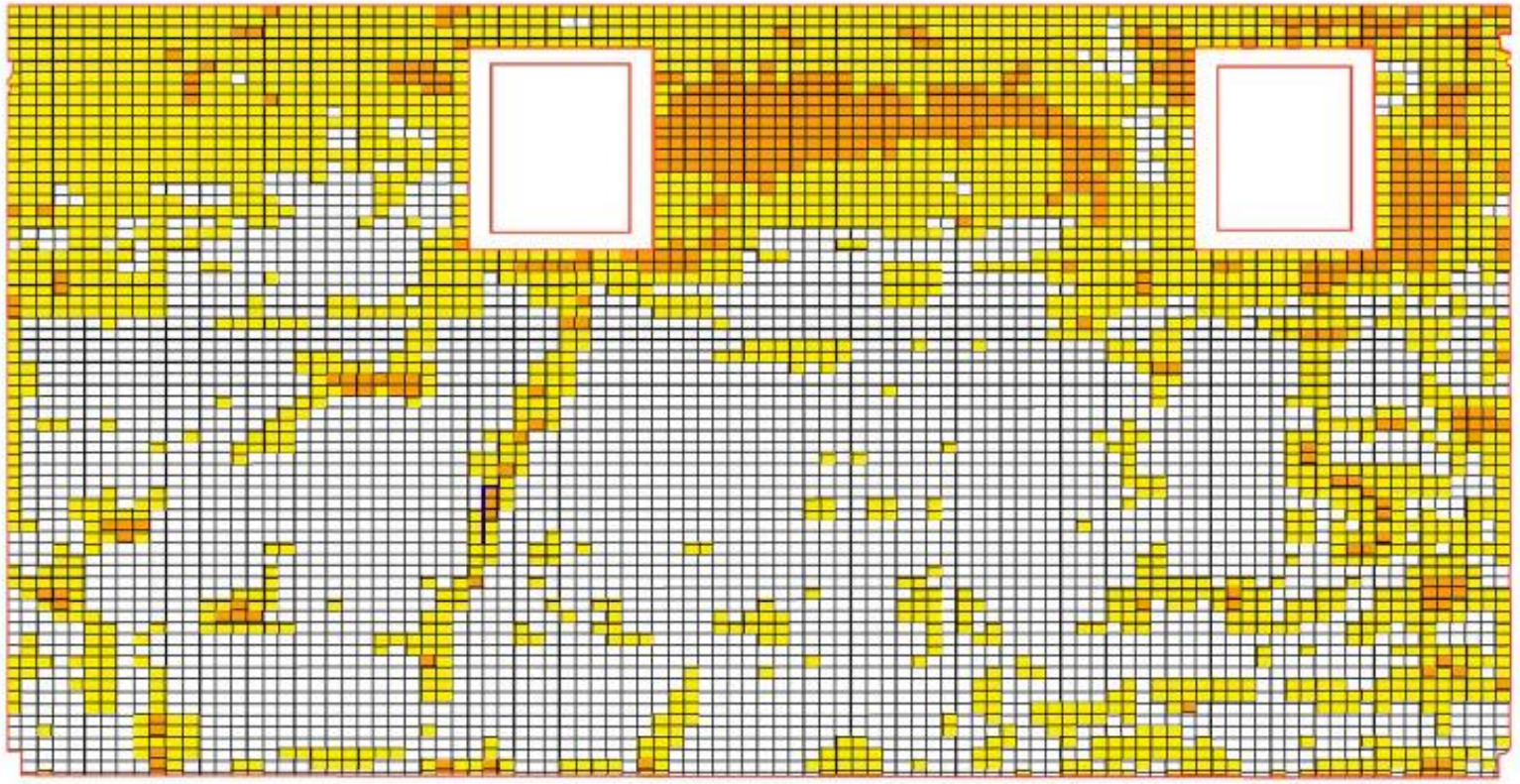
Capela das Almas

3º LEVANTAMENTO

Nave

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



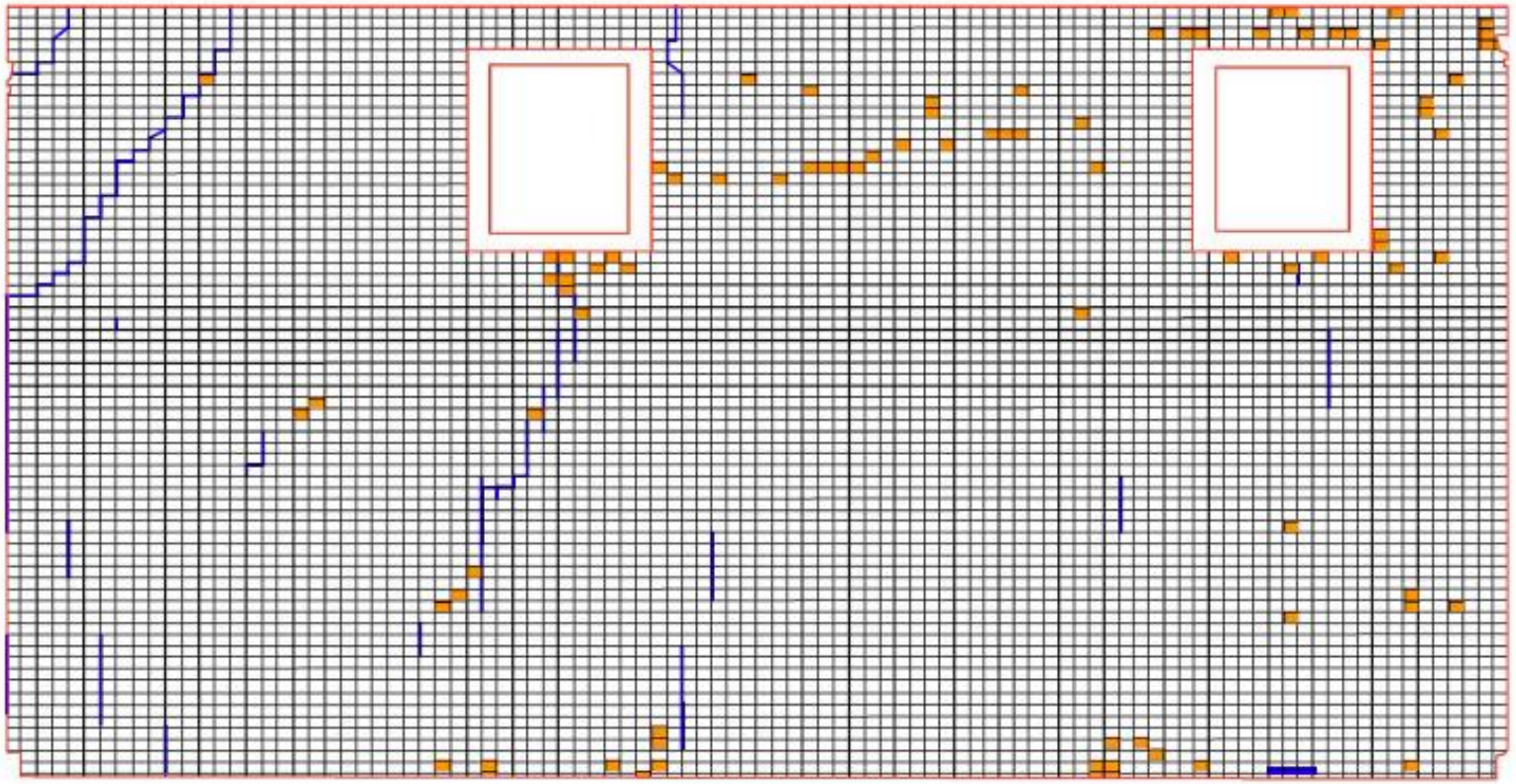
Capela das Almas

4º LEVANTAMENTO

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Nave

arqueologia & património
ricardo teixeira & vítor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

5º LEVANTAMENTO

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Nave

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

1º LEVANTAMENTO - REFERÊNCIA

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Fachada Principal

Fachada, Frontão e Torre

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca · arqueologia lda



Capela das Almas

2º LEVANTAMENTO - PARCIAL

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Fachada Principal

Fachada e Torre

arqueologia & património

ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas	
2º LEVANTAMENTO Azulejos com Patologia Azulejos sem Patologia Azulejos Parcialmente Destacados Azulejos Destacados Fissuras Zonas Inacessíveis	Fachada Principal Frontão arqueologia & património ricardo teixeira & vitor fonseca · arqueologia lda



Capela das Almas	
3º LEVANTAMENTO Azulejos com Patologia Azulejos sem Patologia Azulejos Parcialmente Destacados Azulejos Destacados Fissuras Zonas Inacessíveis	Fachada Principal Fachada e Torre arqueologia & património ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

3º LEVANTAMENTO

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Fachada Principal

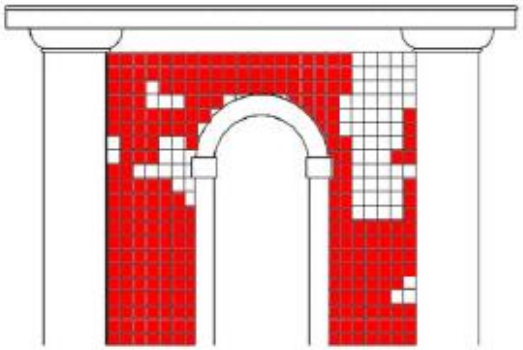
Frontão

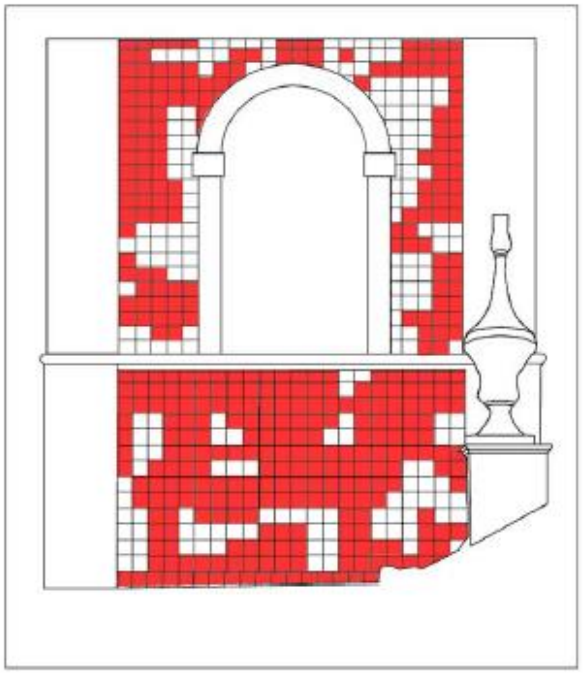
arqueologia & património

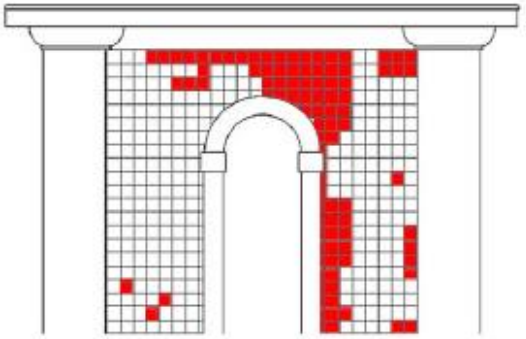
ricardo teixeira & vitor fonseca · arqueologia lda



Capela das Almas	
4º LEVANTAMENTO Azulejos com Patologia Azulejos sem Patologia Azulejos Parcialmente Destacados Azulejos Destacados Fissuras Zonas Inacessíveis	Fachada Principal Fachada e Torre arqueologia & património ricardo teixeira & vitor fonseca · arqueologia lda







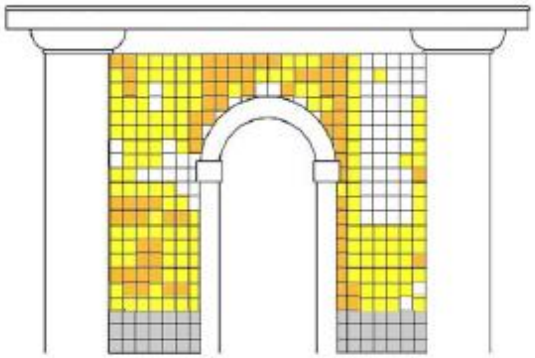
Capela das Almas

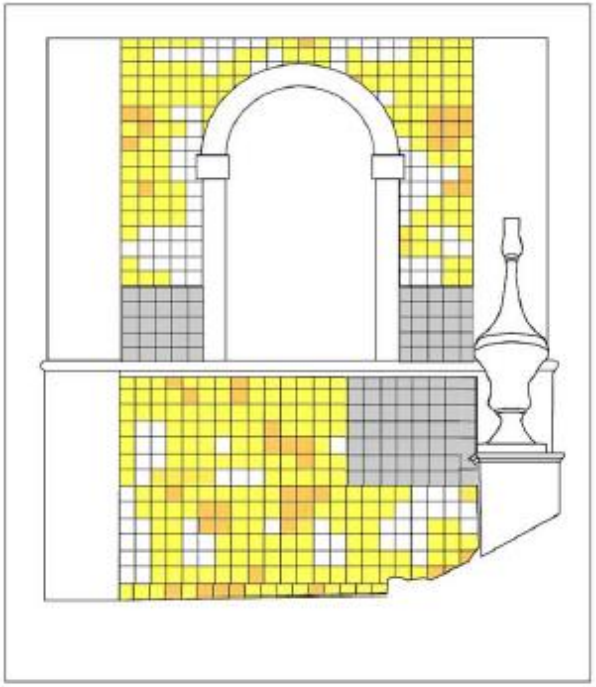
1º LEVANTAMENTO - REFERÊNCIA

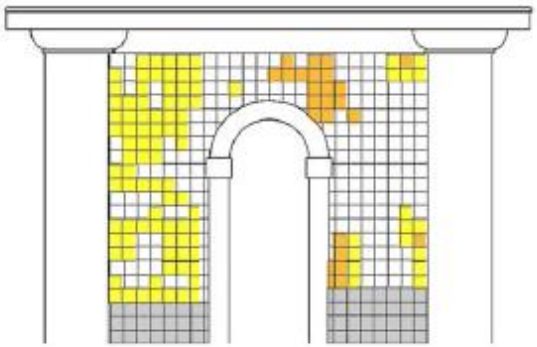
- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Torre Sineira
(Norte, Oeste e Sul)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda







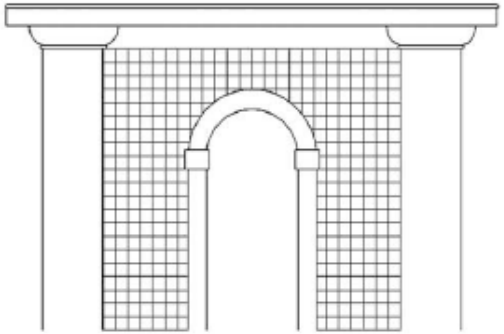
Capela das Almas

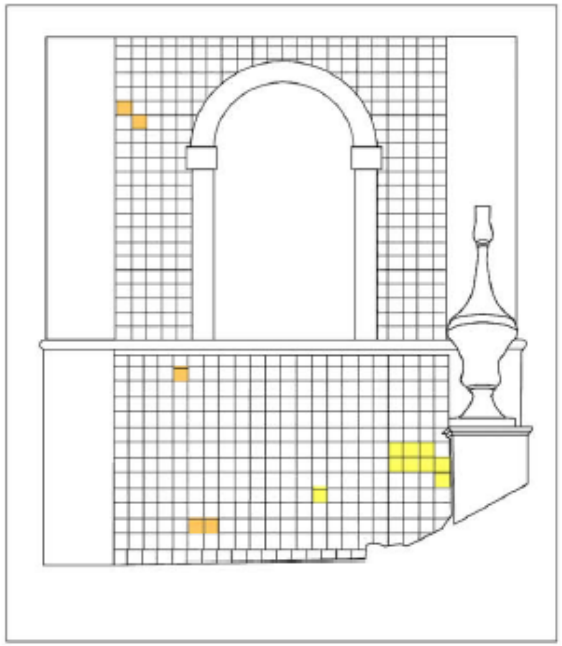
2º LEVANTAMENTO

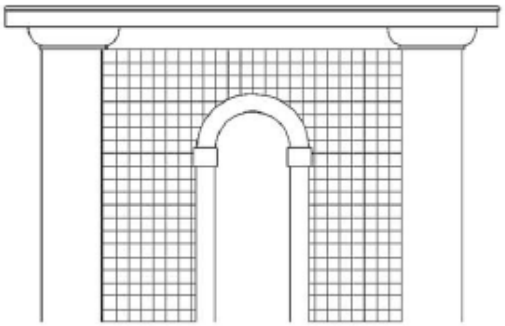
- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Torre Sineira
(Norte, Oeste e Sul)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda







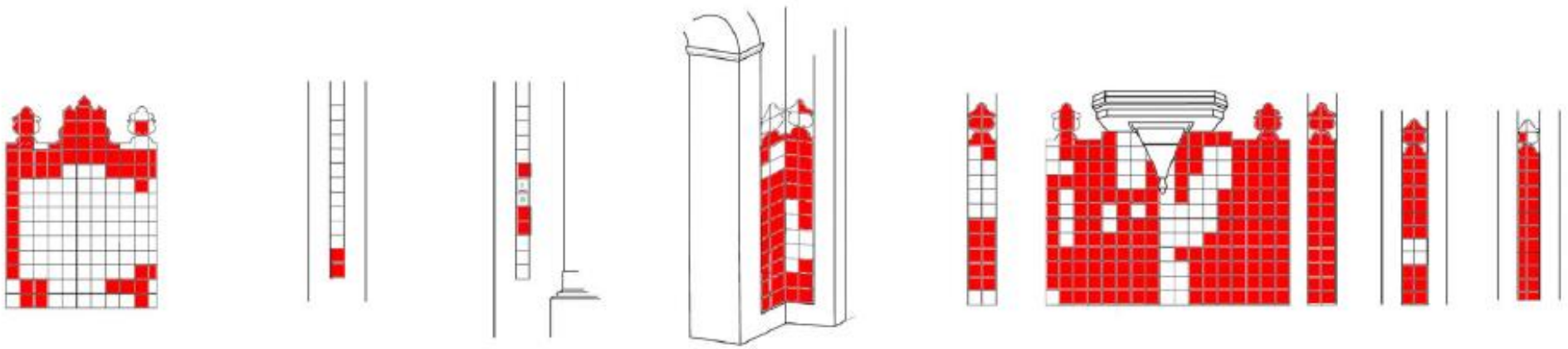
Capela das Almas

3º LEVANTAMENTO

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Torre Sineira
(Norte, Oeste e Sul)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vítor fonseca - arqueologia lda



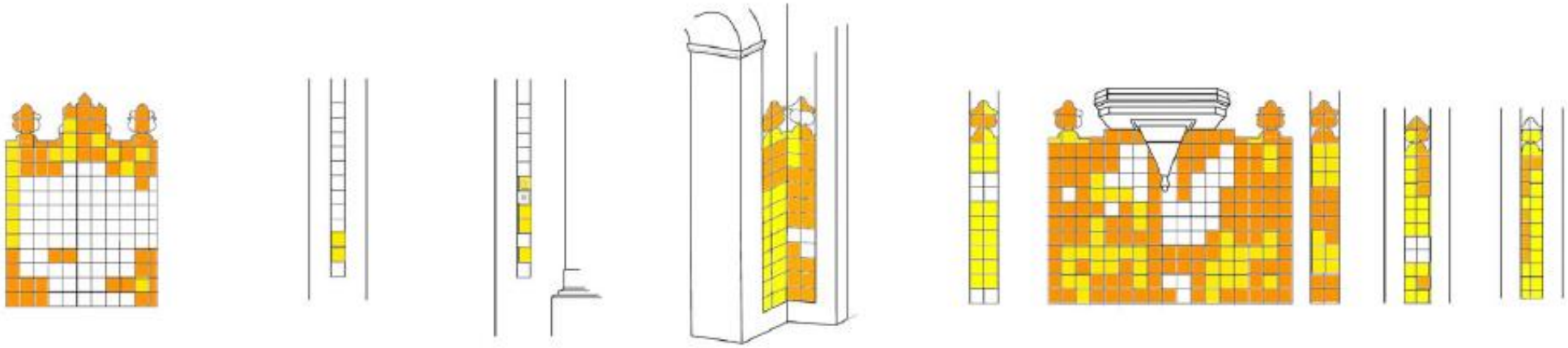
Capela das Almas

1º LEVANTAMENTO - REFERÊCIA

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Capela Interior
(Lado esquerdo)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



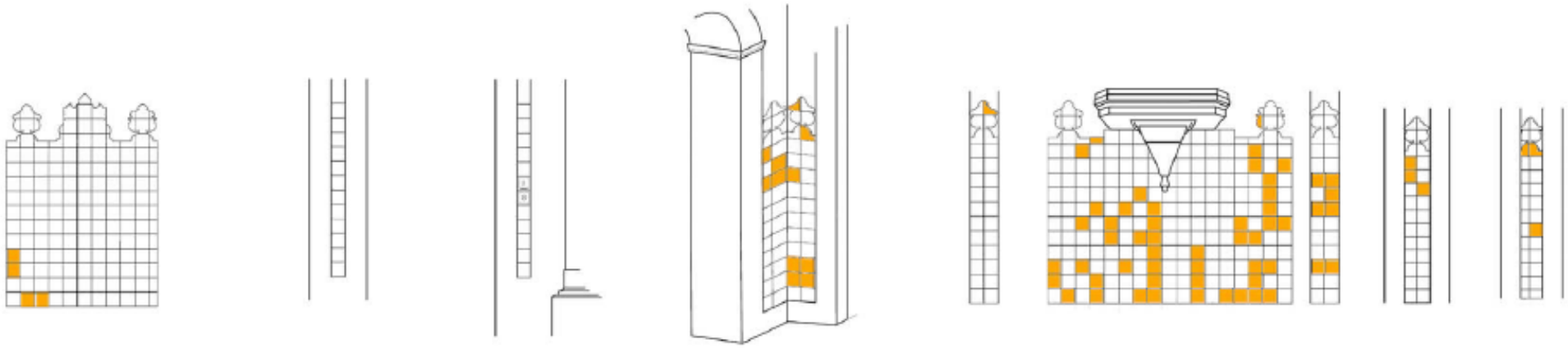
Capela das Almas

2º LEVANTAMENTO

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Capela Interior
(Lado esquerdo)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



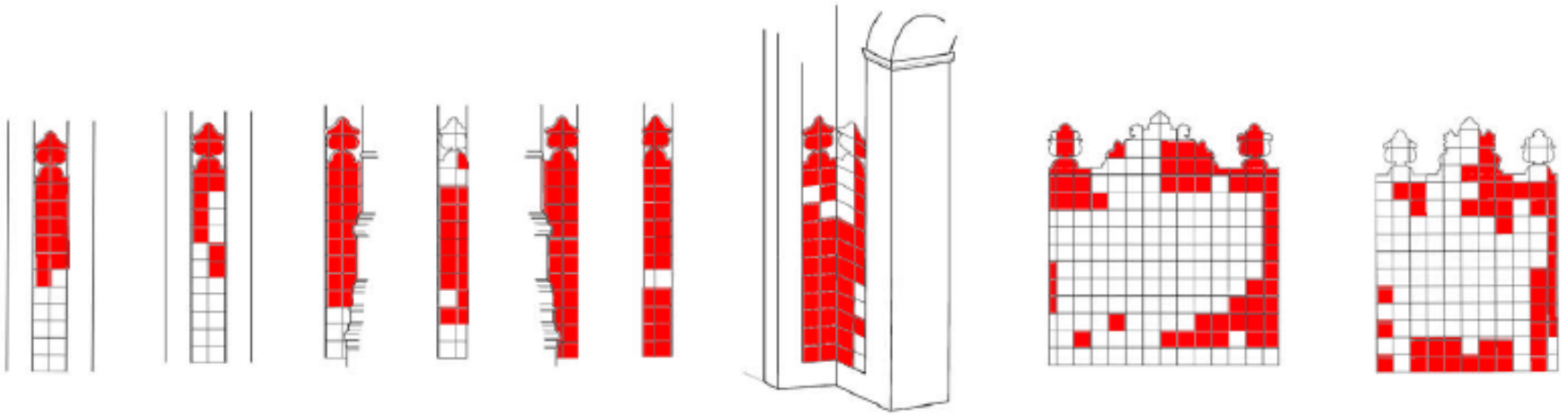
Capela das Almas

3º LEVANTAMENTO

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Capela Interior
(Lado esquerdo)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



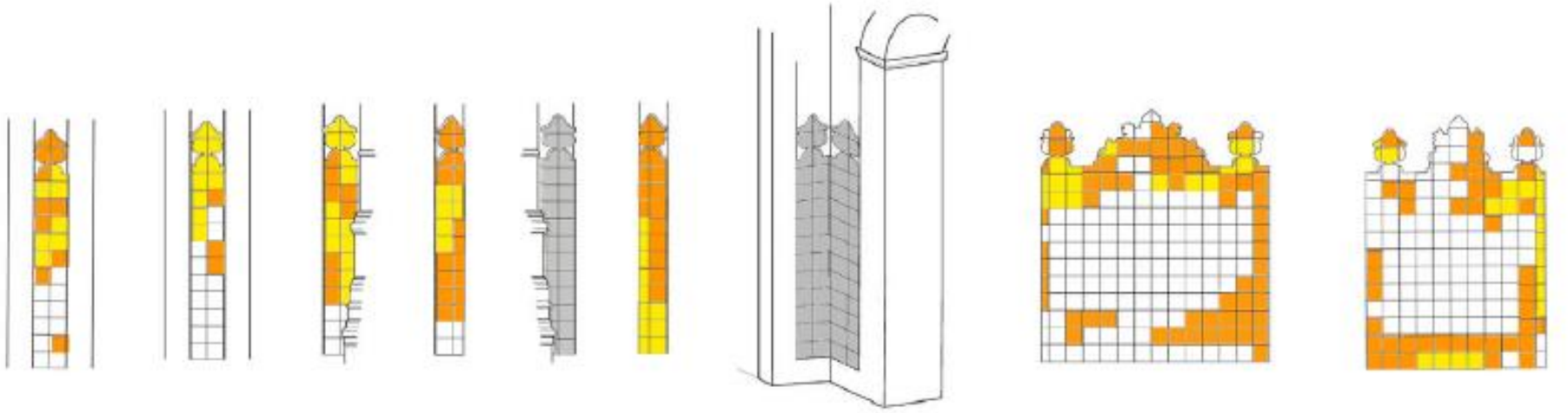
Capela das Almas

1º LEVANTAMENTO - REFERÊCIA

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Capela Interior
(Lado direito)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



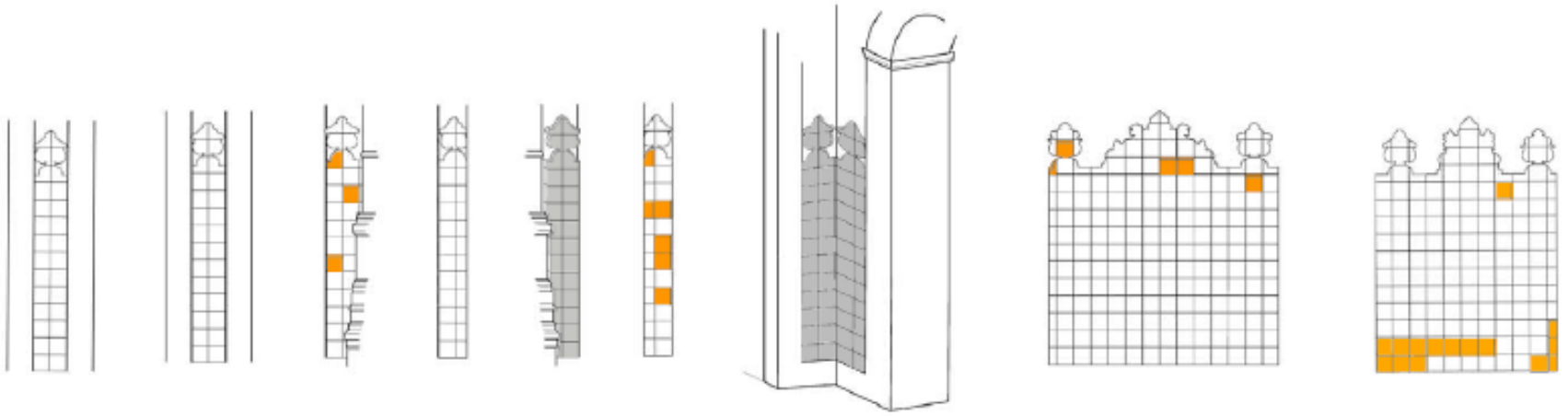
Capela das Almas

2º LEVANTAMENTO

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Capela Interior
(Lado direito)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vítor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

3º LEVANTAMENTO

- Azulejos com Patologia
- Azulejos sem Patologia
- Azulejos Parcialmente Destacados
- Azulejos Destacados
- Fissuras
- Zonas Inacessíveis

Capela Interior
(Lado direito)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda

A.2

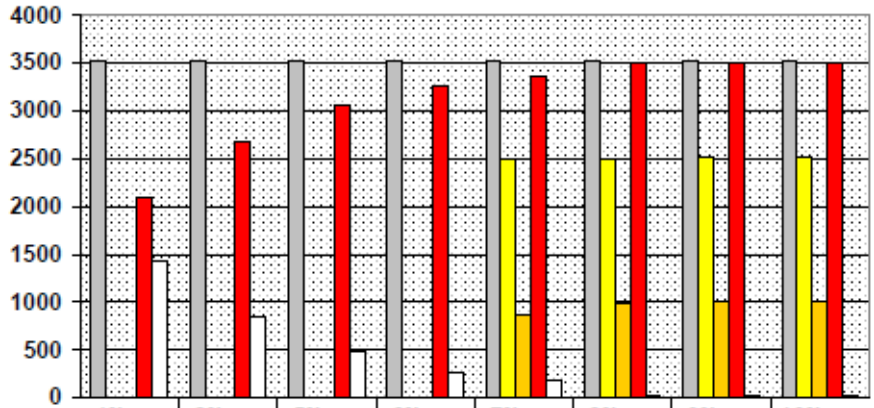
EVOLUÇÃO DAS PATOLOGIAS NOS AZULEJOS AO LONGO DA CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRO DO BOLHÃO

Gráfico 1

Capela-Mor

Evolução e Distinção da Patologias

Valores Globais



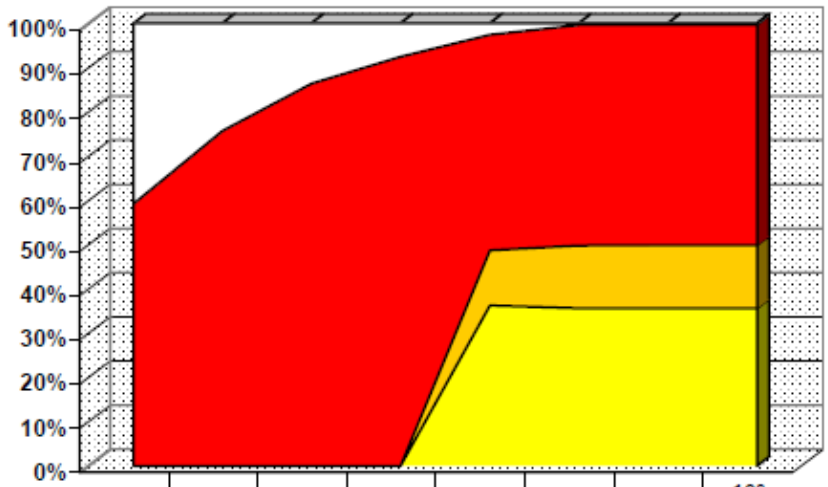
	1ºLev.	3ºLev.	5ºLev.	6ºLev.	7ºLev.	8ºLev.	9ºLev.	10ºLev.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	3534	3534	3534	3534	3534	3534	3534	3534
AZ.PARC.DEST.					2497	2507	2511	2511
AZ. DESTACADOS					860	998	1002	1002
AZ.COM PATOLOGIA	2093	2675	3053	3267	3357	3505	3513	3513
AZ. SEM PATOLOGIA	1441	859	481	267	177	29	21	21

Gráfico 2

Capela-Mor

Evolução e Distinção da Patologias

Valores Globais Percentuais



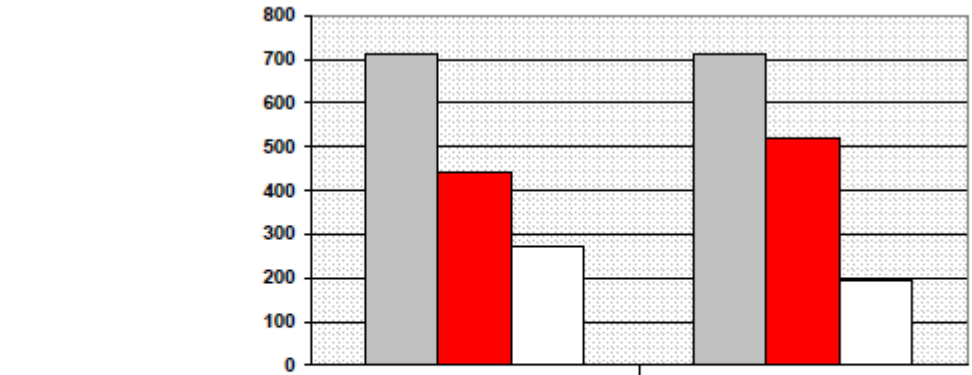
	1º Lev.	3º Lev.	5º Lev.	6º Lev.	7º Lev.	8º Lev.	9º Lev.	10º Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	40,78%	24,31%	13,61%	7,56%	5,01%	0,82%	0,59%	0,59%
AZ.COM PATOLOGIA	59,22%	75,69%	86,39%	92,44%	94,99%	99,18%	99,41%	99,41%
AZ.DESTACADOS					24,34%	28,24%	28,35%	28,35%
AZ. PARC. DEST.					70,66%	70,94%	71,05%	71,05%

Gráfico 3

Capela-Mor

Evolução de Patologias entre o 1º e o 2º levantamento - Após passagem da tuneladora

Valores Parciais



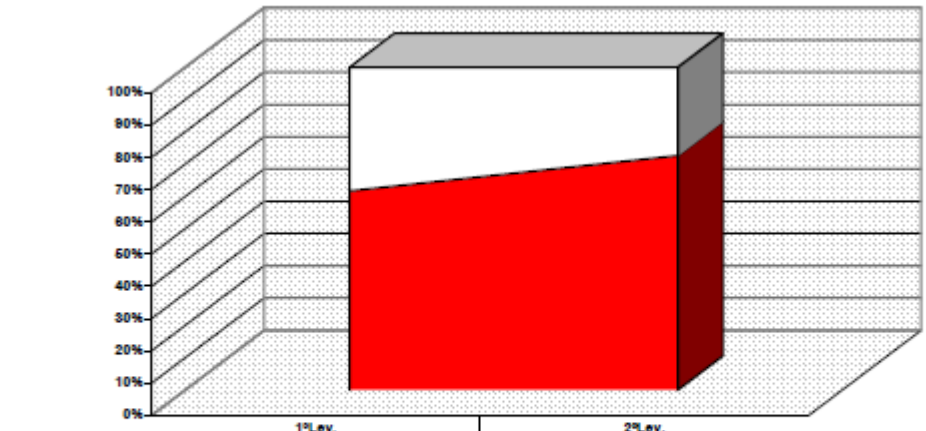
	1ºLev.	2ºLev.
Nº TOTAL AZULEJOS	714	714
AZULEJOS COM PATOLOGIA	440	519
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	274	195

Gráfico 4

Capela-Mor

Evolução de Patologias entre o 1º e o 2º levantamento - Após passagem da tuneladora

Valores Percentuais Parciais



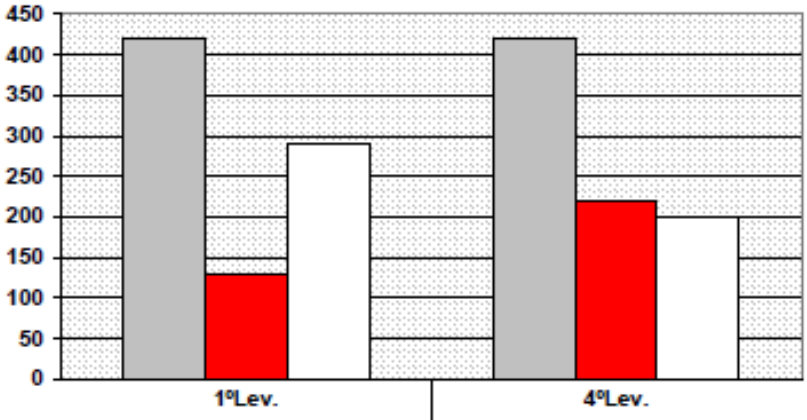
	1ºLev.	2ºLev.
AZ.S/PATOLOGIA	38,38%	27,31%
AZ.C/PATOLOGIA	61,62%	72,69%

Gráfico 5

Capela-Mor

Evolução de Patologias entre o 1º e o 4º levantamento – Abertura do Poço

Valores Parciais



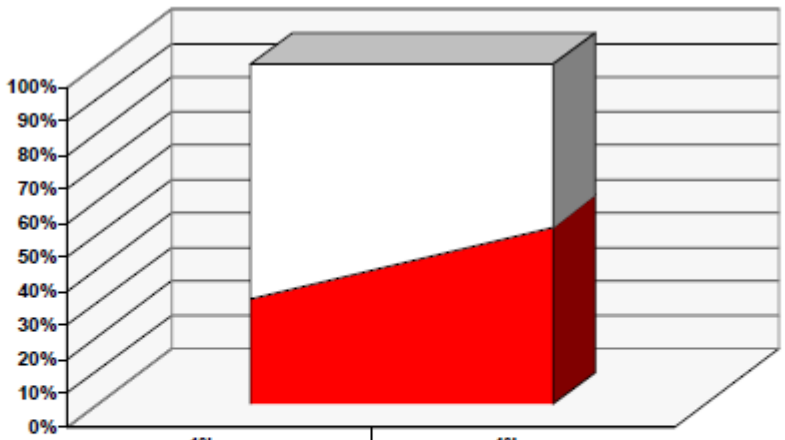
	1ºLev.	4ºLev.
Nº TOTAL AZULEJOS	420	420
AZULEJOS COM PATOLOGIA	129	219
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	291	201

Gráfico 6

Capela-Mor

Evolução de Patologias entre o 1º e o 4º levantamento – Abertura do Poço

Valores Percentuais Parciais



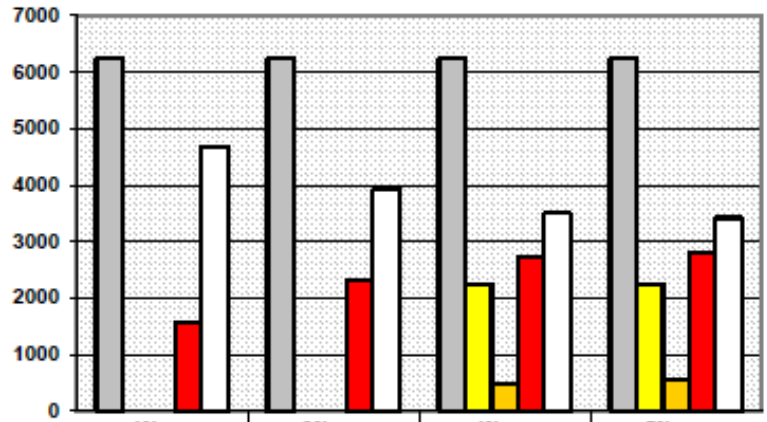
	1ºLev.	4ºLev.
AZ.SEM PATOLOGIA	69,29%	47,86%
AZ.COM PATOLOGIA	30,71%	52,14%

Gráfico 7

Nave

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 3º, 4º e 5º levantamento

Valores Globais



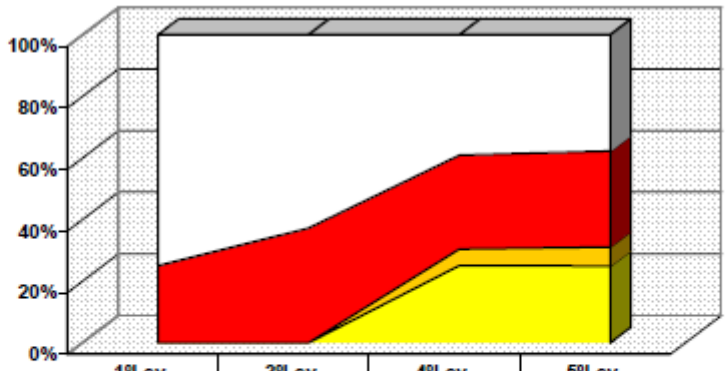
	1ºLev.	3ºLev.	4ºLev.	5ºLev.
Nº TOTAL AZULEJOS	6231	6231	6231	6231
AZUL.PARC.DESTACADOS			2252	2252
AZULEJOS DESTACADOS			477	562
AZULEJOS COM PATOLOGIA	1560	2320	2729	2814
AZULEJOS S/ PATOLOGIAS	4671	3911	3502	3417

Gráfico 8

Nave

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 3º, 4º e 5º levantamento

Valores Globais Percentuais



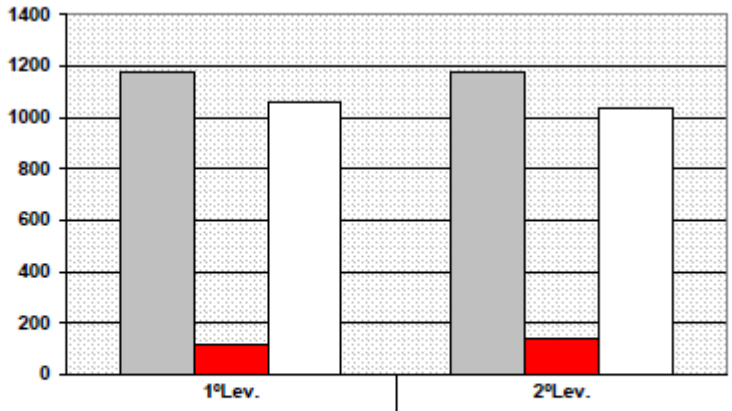
	1ºLev.	3ºLev.	4ºLev.	5ºLev.
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	74,96%	62,77%	56,20%	54,84%
AZULEJOS COM PATOLOGIA	25,04%	37,23%	43,80%	45,16%
AZULEJOS DESTACADOS			7,66%	9,02%
AZUL.PARC.DESTACADOS			36,14%	36,14%

Gráfico 9

Nave

Evolução de Patologias entre o 1º e o 2º levantamento Parcial– Após Passagem da tuneladora

Valores Parciais



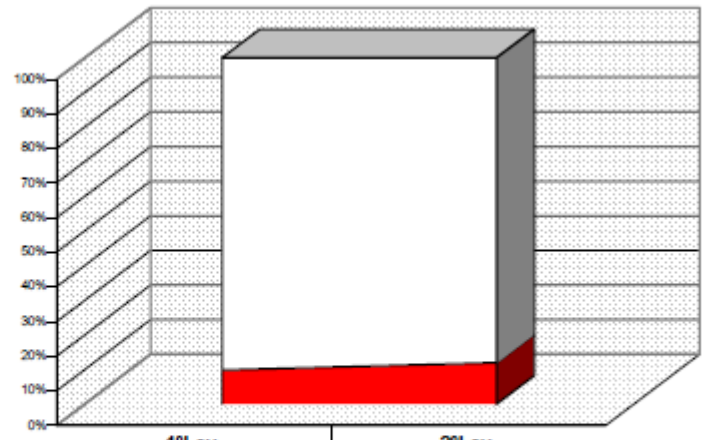
	1ºLev.	2ºLev.
Nº TOTAL AZULEJOS	1173	1173
AZULEJOS COM PATOLOGIA	115	140
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	1058	1033

Gráfico 10

Nave

Evolução de Patologias entre o 1º e o 2º levantamento Parcial– Após Passagem da tuneladora

Valores Percentuais Parciais



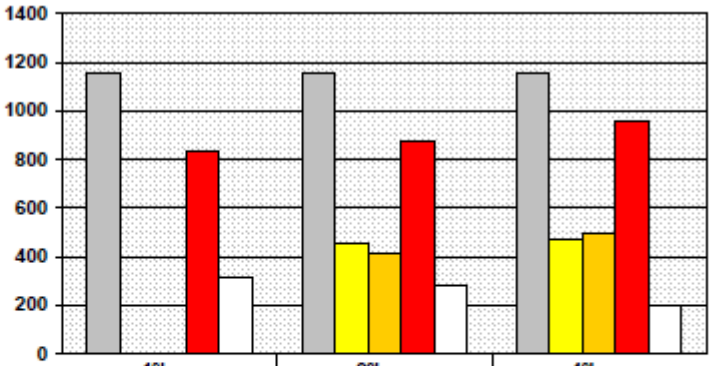
	1ºLev.	2ºLev.
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	90,00%	88,06%
AZULEJOS COM PATOLOGIA	10%	11,94%

Gráfico 11

Fachada Principal - Torre

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 3º e 4º levantamento

Valores Parciais



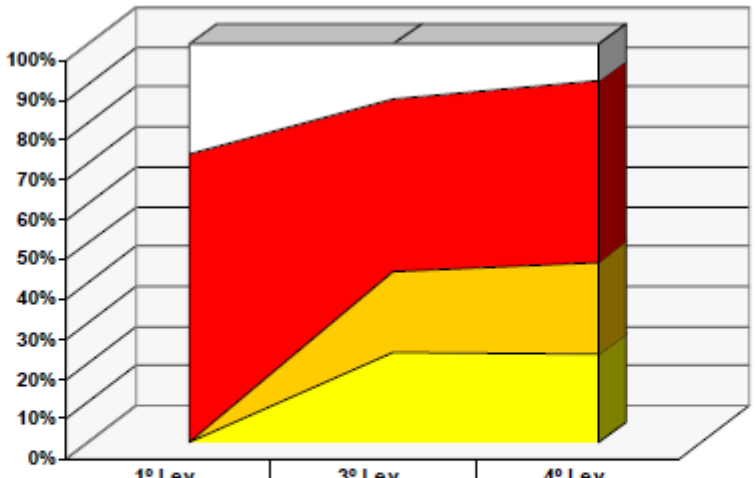
	1ºLev.	3ºLev.	4ºLev.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	1154	1154	1154
AZ. PARC. DESTACADOS		458	467
AZ. DESTACADOS		417	492
AZULEJOS COM PATOLOGIA	837	875	959
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	317	279	195

Gráfico 12

Fachada Principal - Torre

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 3º e 4º levantamento

Valores Parciais Percentuais



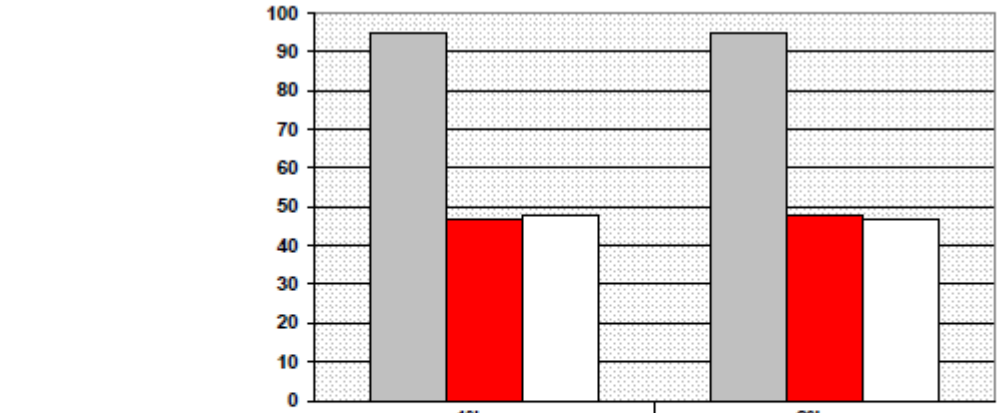
	1º Lev.	3º Lev.	4º Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	27,47%	24,18%	16,90%
AZ.COM PATOLOGIA	72,53%	75,82%	83,10%
AZ.DESTACADOS		36,14%	42,63%
AZ. PARC. DEST.		39,69%	40,47%

Gráfico 13

Fachada Principal - Torre

Evolução de Patologias entre o 1º e o 2º levantamento Parcial– Após Passagem da tuneladora

Valores Parciais



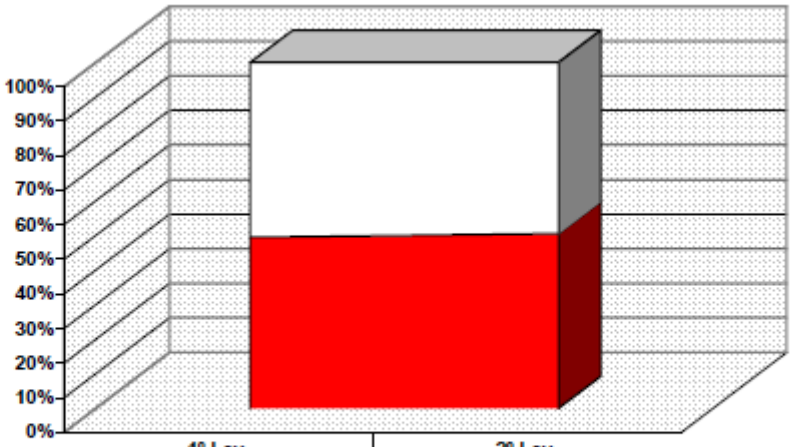
	1ºLev.	2ºLev.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	95	95
AZULEJOS COM PATOLOGIA	47	48
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	48	47

Gráfico 14

Fachada Principal - Torre

Evolução de Patologias entre o 1º e o 2º levantamento Parcial– Após Passagem da tuneladora

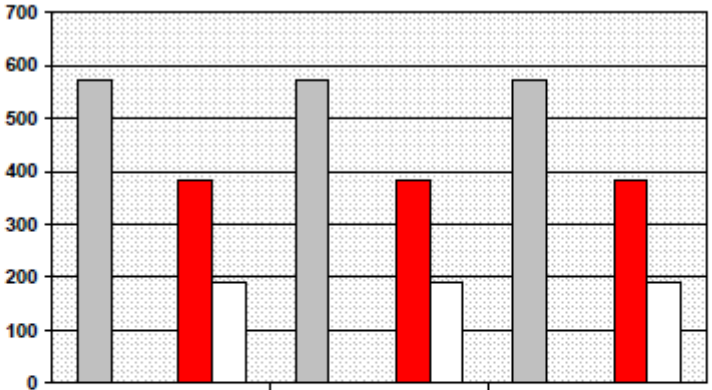
Valores Percentuais Parciais



	1º Lev.	2º Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	50,53%	49,47%
AZ.COM PATOLOGIA	49,47%	50,53%

Gráfico 15

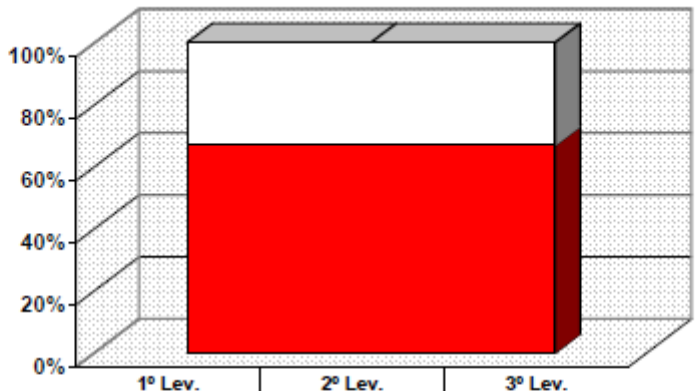
Fachada Principal – Torre Sineira Alçado Oeste
Evolução de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento
Valores Parciais



	1ºLev.	2ºLev.	3ºLev.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	572	572	572
AZ. PARC. DESTACADOS			
AZ. DESTACADOS			
AZULEJOS COM PATOLOGIA	382	382	382
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	190	190	190

Gráfico 16

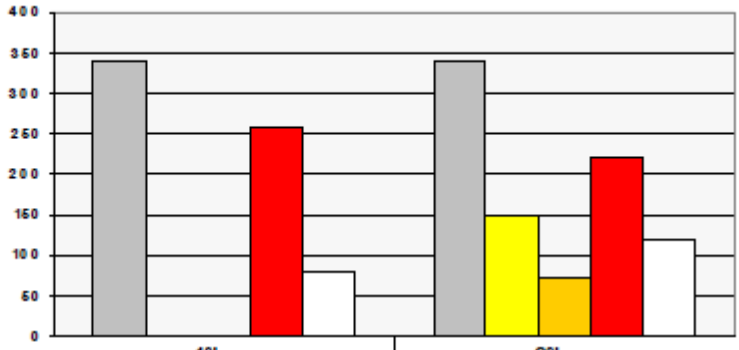
Fachada Principal – Torre Sineira Alçado Oeste
Evolução de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento
Valores Percentuais Parciais



	1º Lev.	2º Lev.	3º Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	33,22%	33,22%	33,22%
AZ.COM PATOLOGIA	66,78%	66,78%	66,78%
AZ.DESTACADOS			
AZ. PARC. DEST.			

Gráfico 17

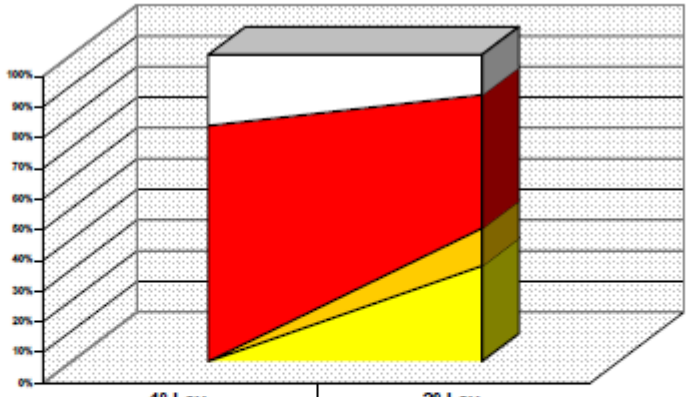
Fachada Principal – Torre Sineira Alçado Norte
Evolução e Distinção de Patologias - 1º e 2º levantamento
Valores Parciais



	1ºLev.	2ºLev.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	339	339
AZ. PARC. DESTACADOS		147
AZ. DESTACADOS		73
AZULEJOS COM PATOLOGIA	260	220
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	79	119

Gráfico 18

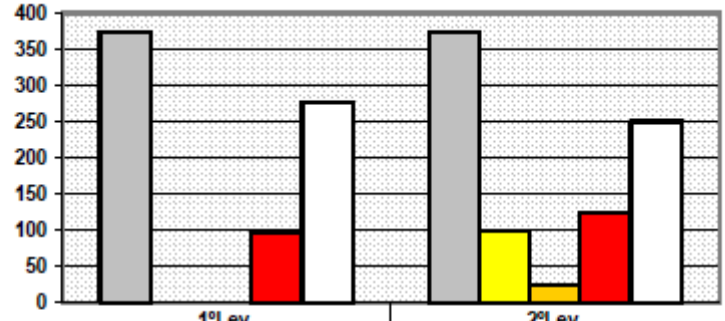
Fachada Principal – Torre Sineira Alçado Norte
Evolução e Distinção de Patologias - 1º e 2º levantamento
Valores Percentuais Parciais



	1º Lev.	2º Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	23,14%	23,14%
AZ.COM PATOLOGIA	76,86%	76,86%
AZ.DESTACADOS		21,53%
AZ. PARC. DEST.		55,16%

Gráfico 19

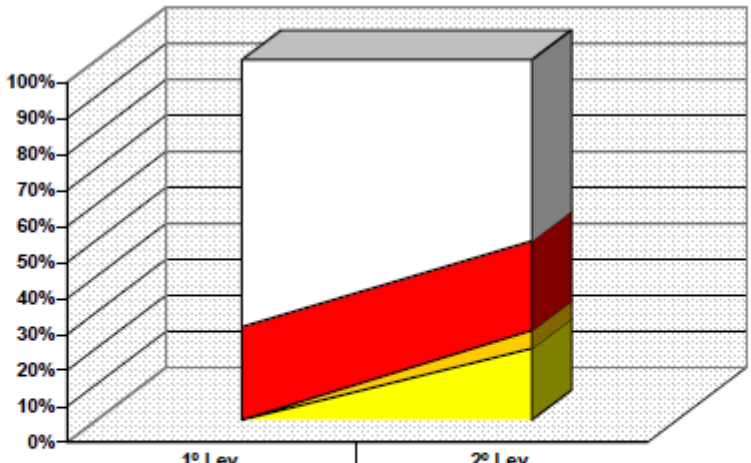
Fachada Principal – Torre Sineira Alçado Sul
Evolução e Distinção de Patologias - 1º e 2º levantamento
Valores Parciais



	1ºLev.	2ºLev.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	374	374
AZ. PARC. DESTACADOS		99
AZ. DESTACADOS		25
AZULEJOS COM PATOLOGIA	97	124
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	277	250

Gráfico 20

Fachada Principal – Torre Sineira Alçado Sul
Evolução e Distinção de Patologias - 1º e 2º levantamento
Valores Percentuais Parciais



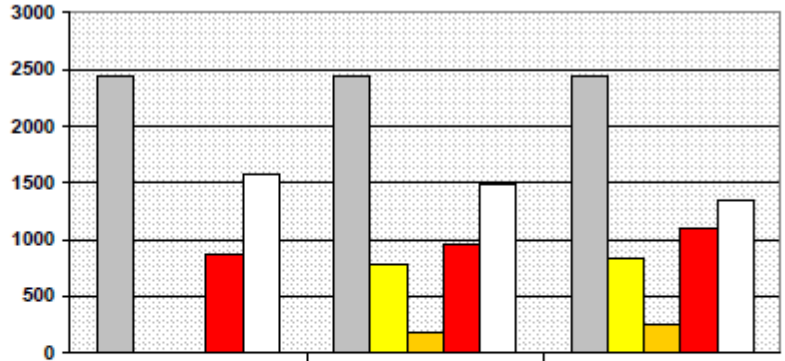
	1º Lev.	2º Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	74,06%	66,84%
AZ.COM PATOLOGIA	25,94%	33,16%
AZ.DESTACADOS		6,68%
AZ. PARC. DEST.		26,47%

Gráfico 21

Fachada Principal – Fachada

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 3º e 4º levantamento

Valores Parciais



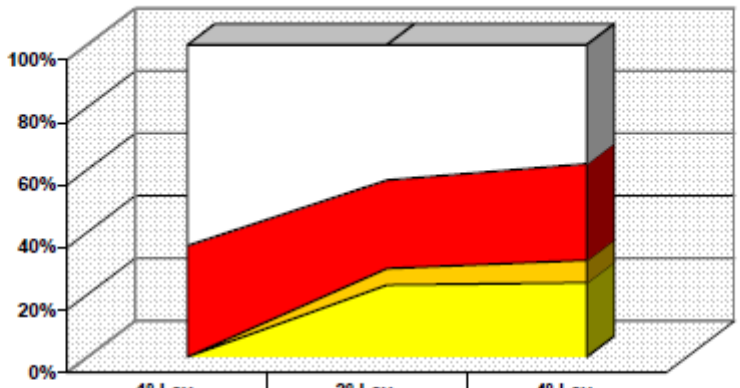
	1ºLev.	3ºLev.	4ºLev.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	2442	2442	2442
AZ. PARC. DESTACADOS		785	842
AZ. DESTACADOS		179	252
AZULEJOS COM PATOLOGIA	871	964	1094
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	1571	1478	1348

Gráfico 22

Fachada Principal – Fachada

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 3º e 4º levantamento

Valores Percentuais Parciais



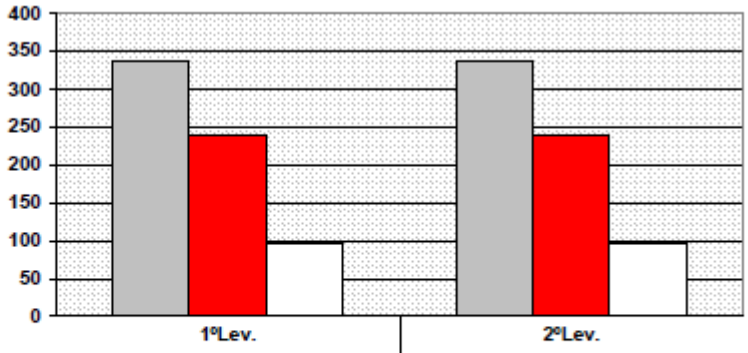
	1º Lev.	3º Lev.	4º Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	64,33%	60,52%	55,20%
AZ.COM PATOLOGIA	35,67%	39,48%	44,80%
AZ.DESTACADOS		7,33%	10,32%
AZ. PARC. DEST.		32,15%	34,48%

Gráfico 23

Fachada Principal – Fachada

Evolução e Distinção de Patologias - 1º e 2º levantamento

Valores Parciais



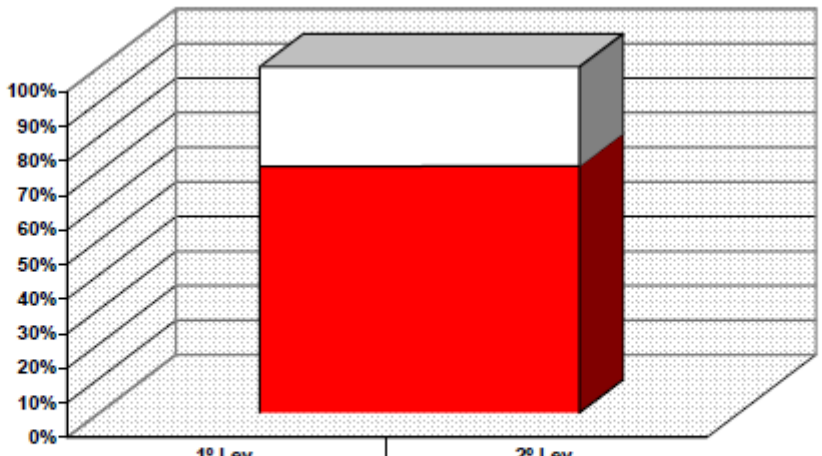
	1ºLev.	2ºLev.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	336	336
AZULEJOS COM PATOLOGIA	239	240
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	97	96

Gráfico 24

Fachada Principal – Fachada

Evolução e Distinção de Patologias - 1º e 2º levantamento

Valores Percentuais Parciais



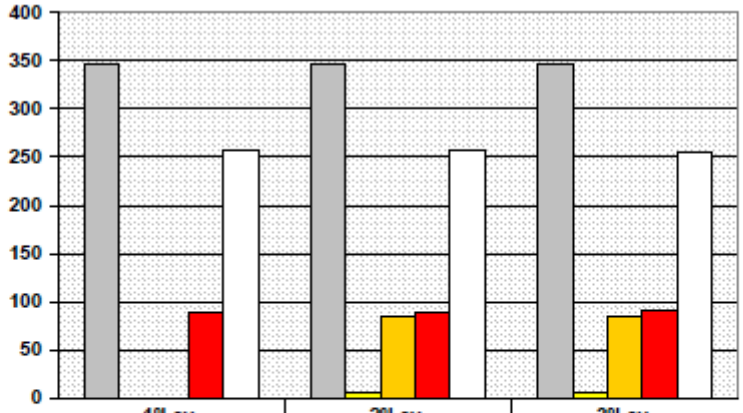
	1º Lev.	2º Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	28,87%	28,57%
AZ.COM PATOLOGIA	71,13%	71,43%

Gráfico 25

Fachada Principal – Frontão

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento

Valores Parciais



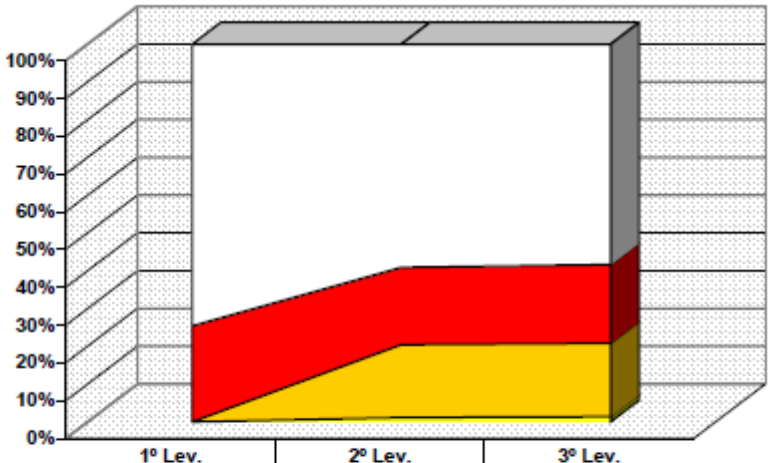
	1ºLev.	2ºLev.	3ºLev.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	346	346	346
AZ. PARC. DESTACADOS		5	6
AZ. DESTACADOS		84	85
AZULEJOS COM PATOLOGIA	88	89	91
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	258	257	255

Gráfico 26

Fachada Principal – Frontão

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento

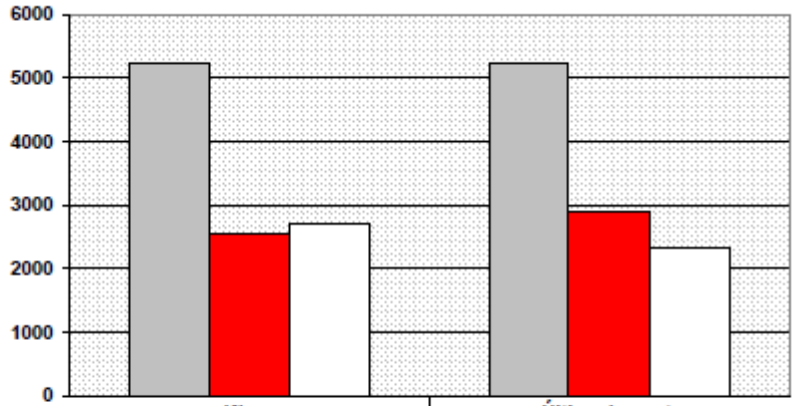
Valores Percentuais Parciais



	1º Lev.	2º Lev.	3º Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	74,57%	74,28%	73,70%
AZ.COM PATOLOGIA	25,43%	25,72%	26,30%
AZ.DESTACADOS		24,28%	24,57%
AZ. PARC. DEST.		1,45%	1,73%

Gráfico 27

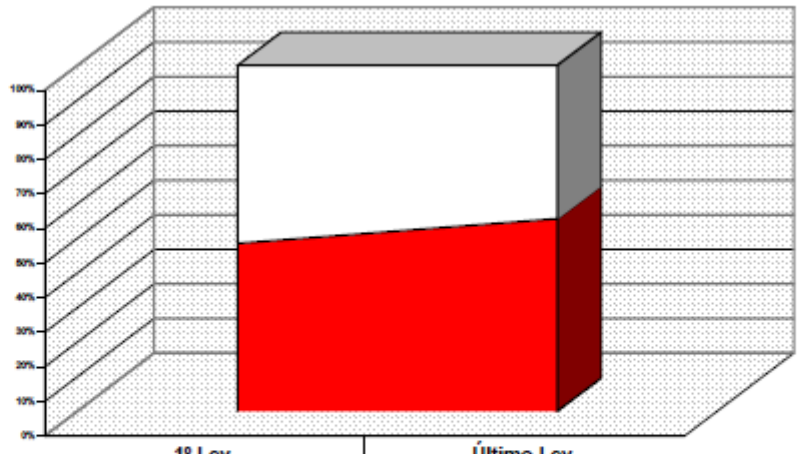
Fachada Principal – Conjunto de todas as zonas
Evolução de Patologias - 1ºe último levantamento



	1ºLev.	Último Levant.
Nº TOTAL DE AZULEJOS	5227	5227
AZULEJOS COM PATOLOGIA	2535	2910
AZULEJOS SEM PATOLOGIA	2692	2317

Gráfico 28

Fachada Principal – Conjunto de todas as zonas
Evolução de Patologias - 1ºe último levantamento
Valores Percentuais

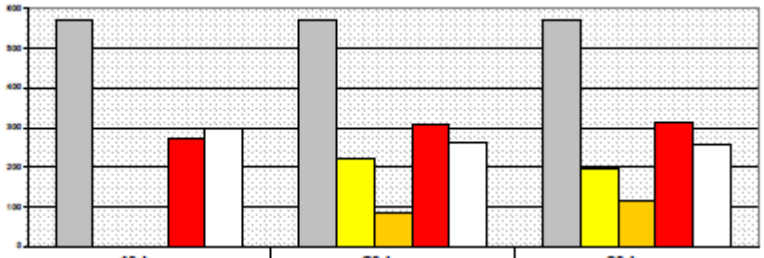


	1º Lev.	Último Lev.
AZ.SEM PATOLOGIA	51,50%	44,33%
AZ.COM PATOLOGIA	48,50%	55,67%

Gráfico 29

Interior da Capela – Lado direito

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento



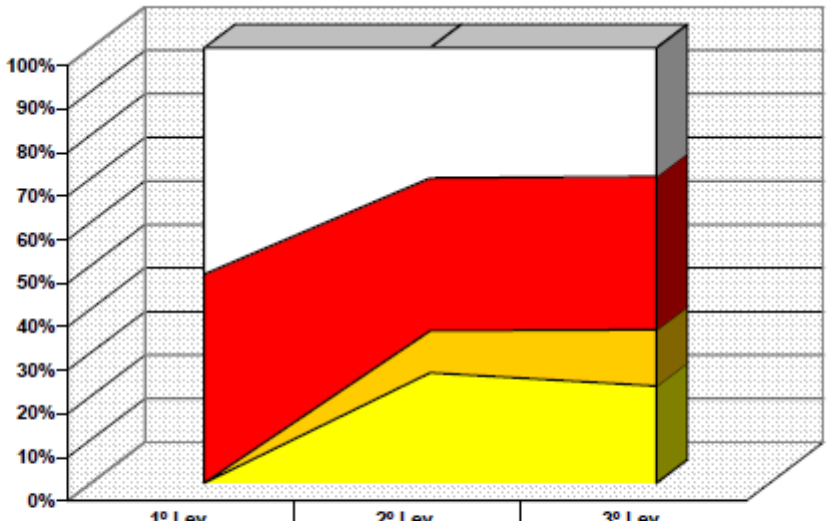
	1º Lev.	2º Lev.	3º Lev.
TOTAL AZULEJOS	571	571	571
AZ. PARC. DEST.		223	197
AZ.DESTACADOS		85	114
AZ. COM PATOLOGIA	274	308	311
AZ. SEM PATOLOGIA	297	263	260

Gráfico 30

Interior da Capela – Lado direito

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento

Valores Percentuais

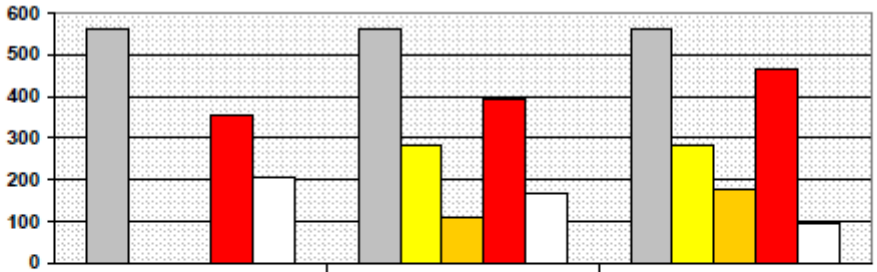


	1º Lev.	2º Lev.	3º Lev.
AZ. SEM PATOLOGIA	52,01%	46,06%	45,53%
AZ. COM PATOLOGIA	47,99%	53,94%	54,47%
AZ.DESTACADOS		14,89%	19,96%
AZ. PARC. DEST.		39,05%	34,50%

Gráfico 31

Interior da Capela – Lado esquerdo

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento



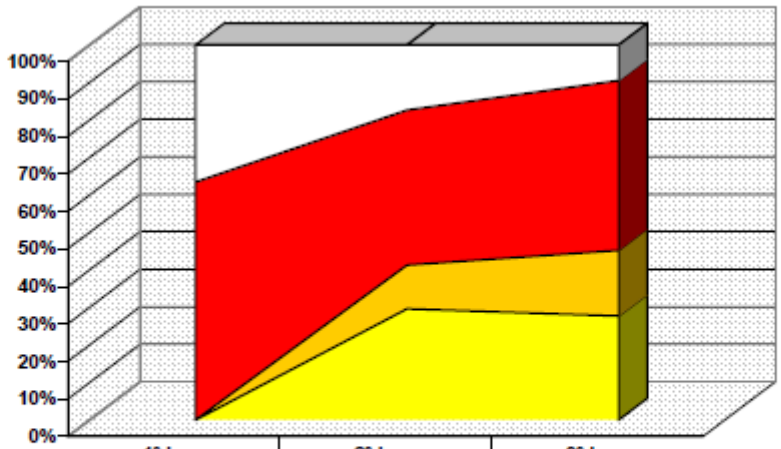
	1º Lev.	2º Lev.	3º Lev.
TOTAL AZULEJOS	561	561	561
AZ. PARC. DEST.		284	284
AZ.DESTACADOS		111	180
AZ. C/ PATOLOGIA	356	395	464
AZ. S/ PATOLOGIA	205	166	97

Gráfico 32

Interior da Capela – Lado direito

Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento

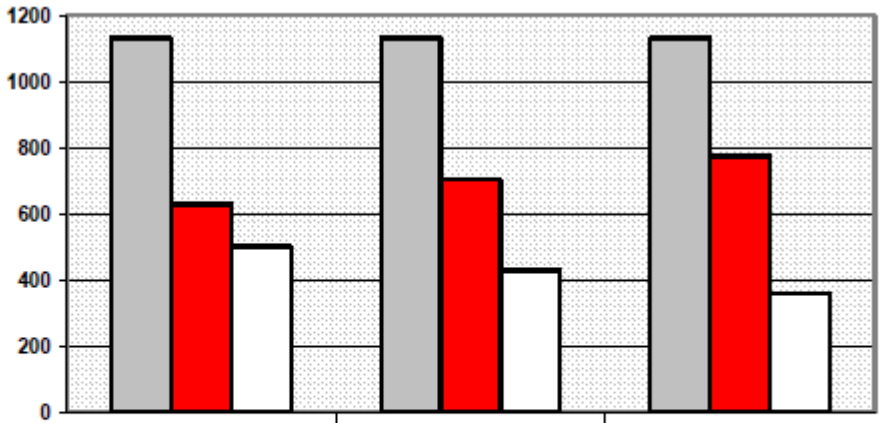
Valores Percentuais



	1º Lev.	2º Lev.	3º Lev.
AZ. SEM PATOLOGIA	36,54%	29,59%	17,29%
AZ. COM PATOLOGIA	63,46%	70,41%	82,71%
AZ.DESTACADOS		19,79%	32,09%
AZ. PARC. DEST.		50,62%	50,62%

Gráfico 33

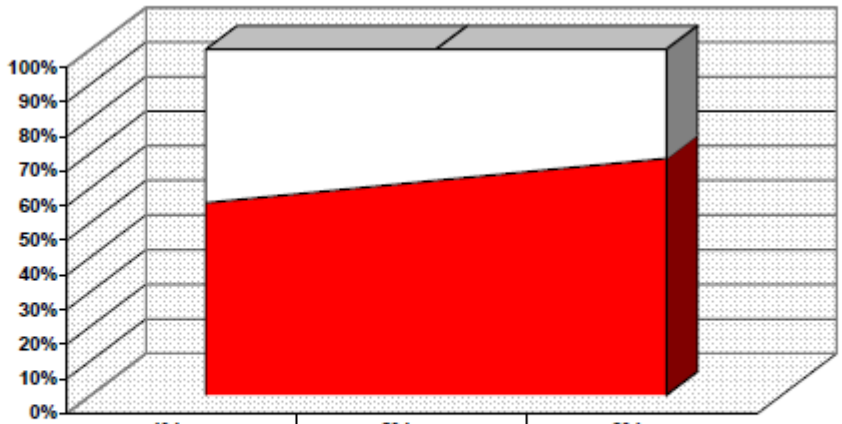
Interior da Capela – Lado direito e esquerdo
Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento
Valores Parciais



	1º Lev.	2º Lev.	3º Lev.
TOTAL AZULEJOS	1132	1132	1132
AZ. COM PATOLOGIA	630	703	775
AZ. SEM PATOLOGIA	502	429	357

Gráfico 34

Interior da Capela – Lado direito e esquerdo
Evolução e Distinção de Patologias - 1º, 2º e 3º levantamento
Valores Parciais Percentuais



	1º Lev.	2º Lev.	3º Lev.
AZ. SEM PATOLOGIA	44,35%	37,89%	31,54%
AZ. COM PATOLOGIA	55,65%	62,10%	68,46%

Gráfico 35

Capela-Mor

Evolução de Patologias entre o 1º e último levantamento

Valores Percentuais

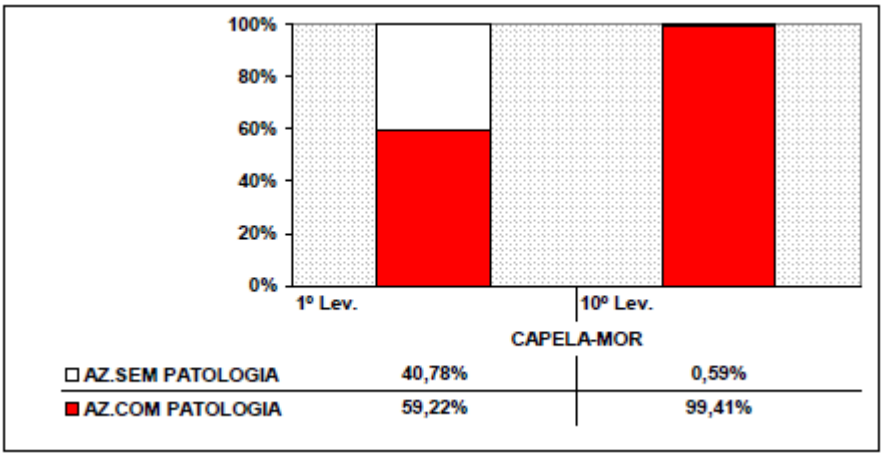


Gráfico 36

Nave

Evolução de Patologias entre o 1º e último levantamento

Valores Percentuais

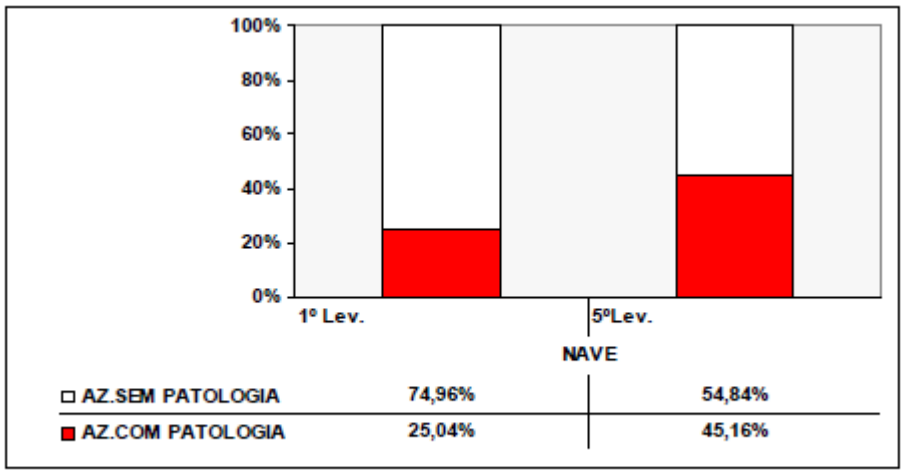


Gráfico 37

Fachada

Evolução de Patologias entre o 1º e último levantamento

Valores Percentuais

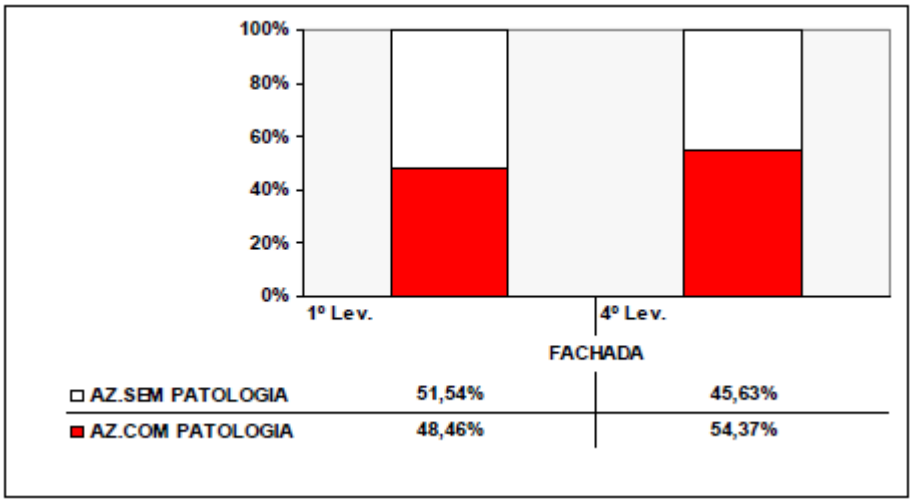


Gráfico 38

Interior da Capela

Evolução de Patologias entre o 1º e último levantamento

Valores Percentuais

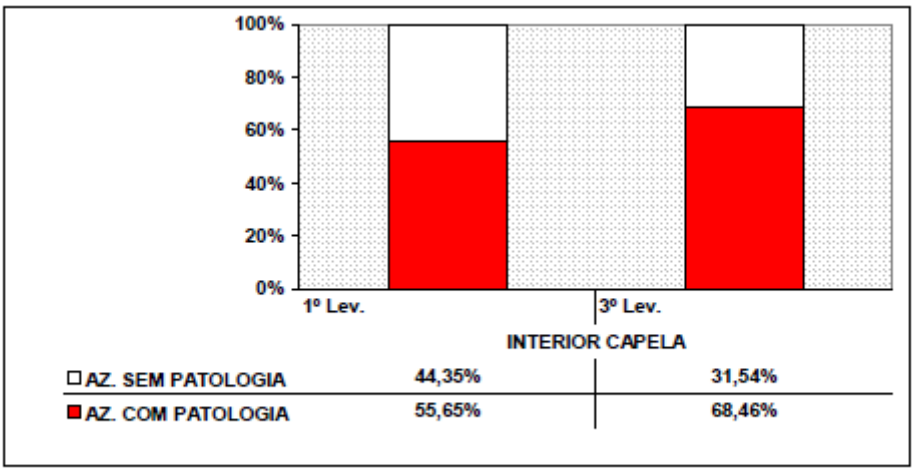
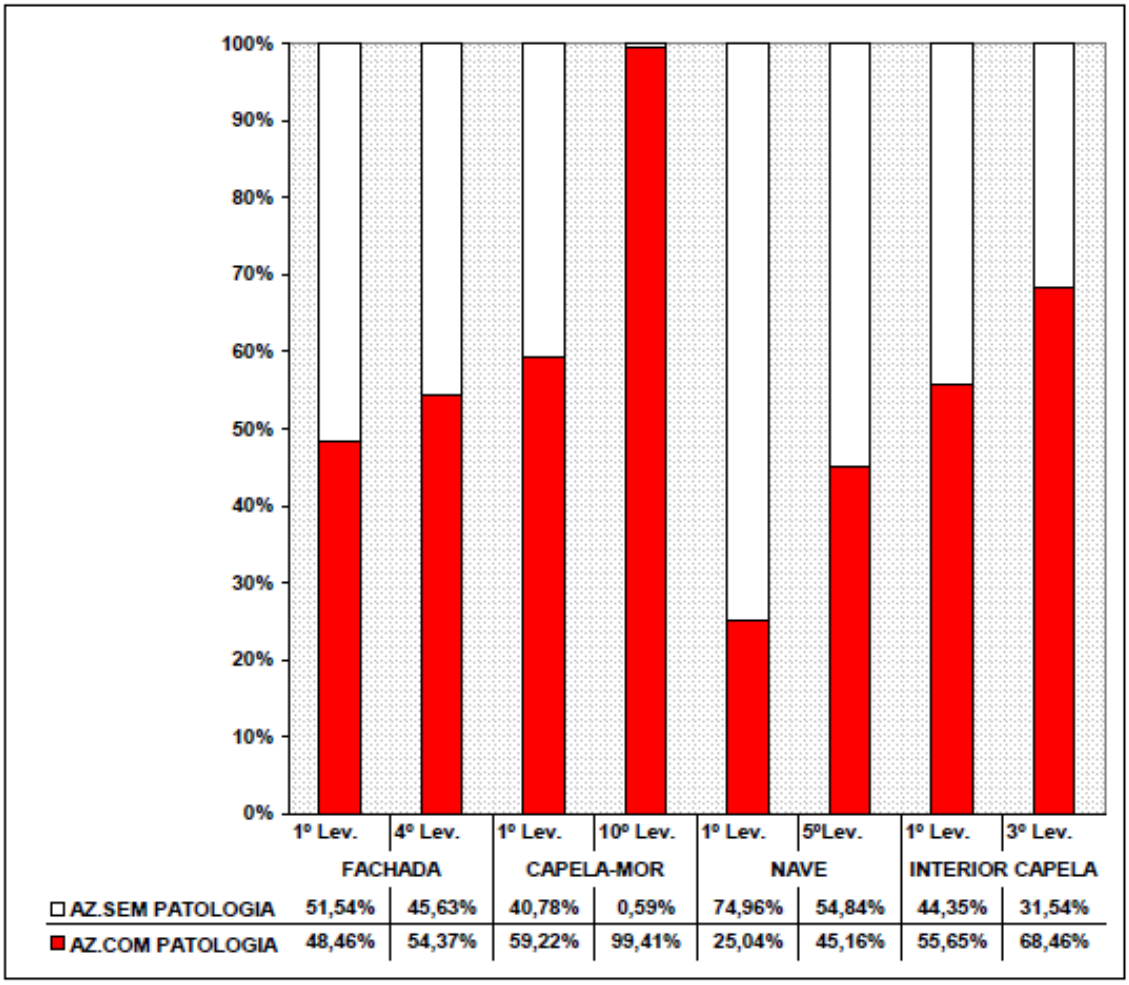


Gráfico 39

Capela das Almas

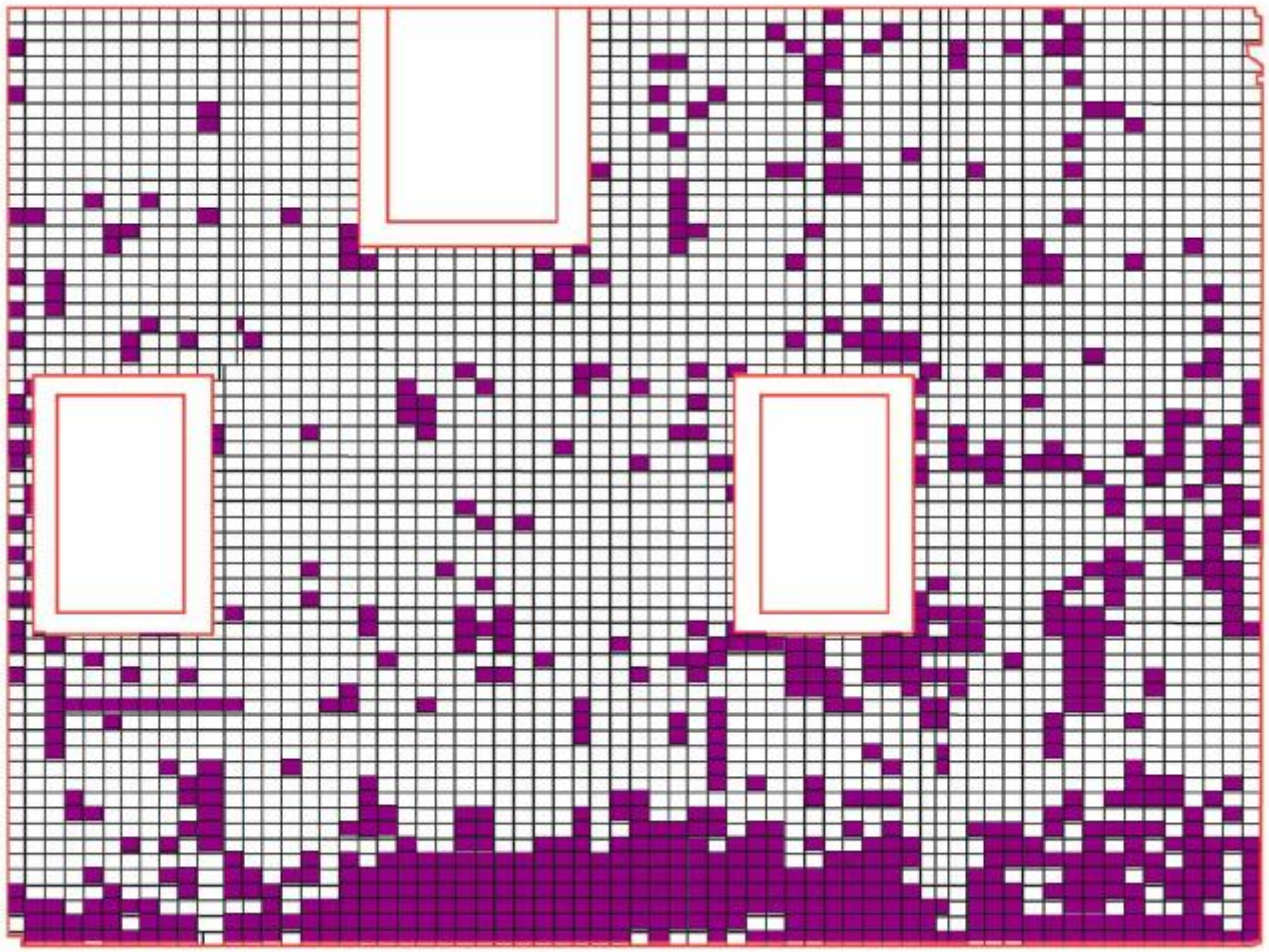
Evolução de Patologias entre o 1º e último levantamento

Valores Percentuais



A.3

INTERVENÇÕES NOS AZULEJOS APÓS A CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRO DO BOLHÃO



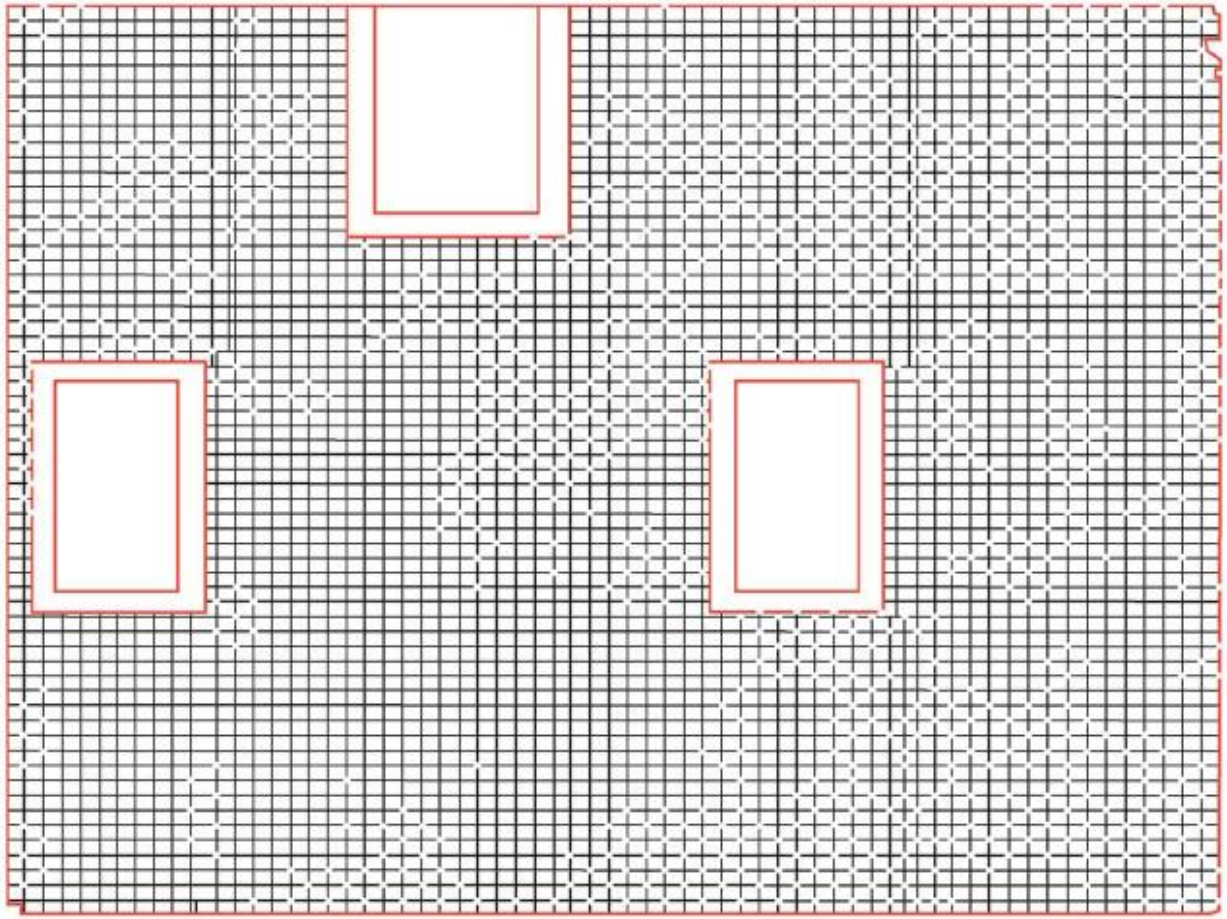
Capela das Almas

REINTEGRAÇÕES VOLUMÉTRICAS E CROMÁTICAS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Capela-Mor

arqueologia & património
ricardo teixeira & vítor fonseca - arqueologia lda



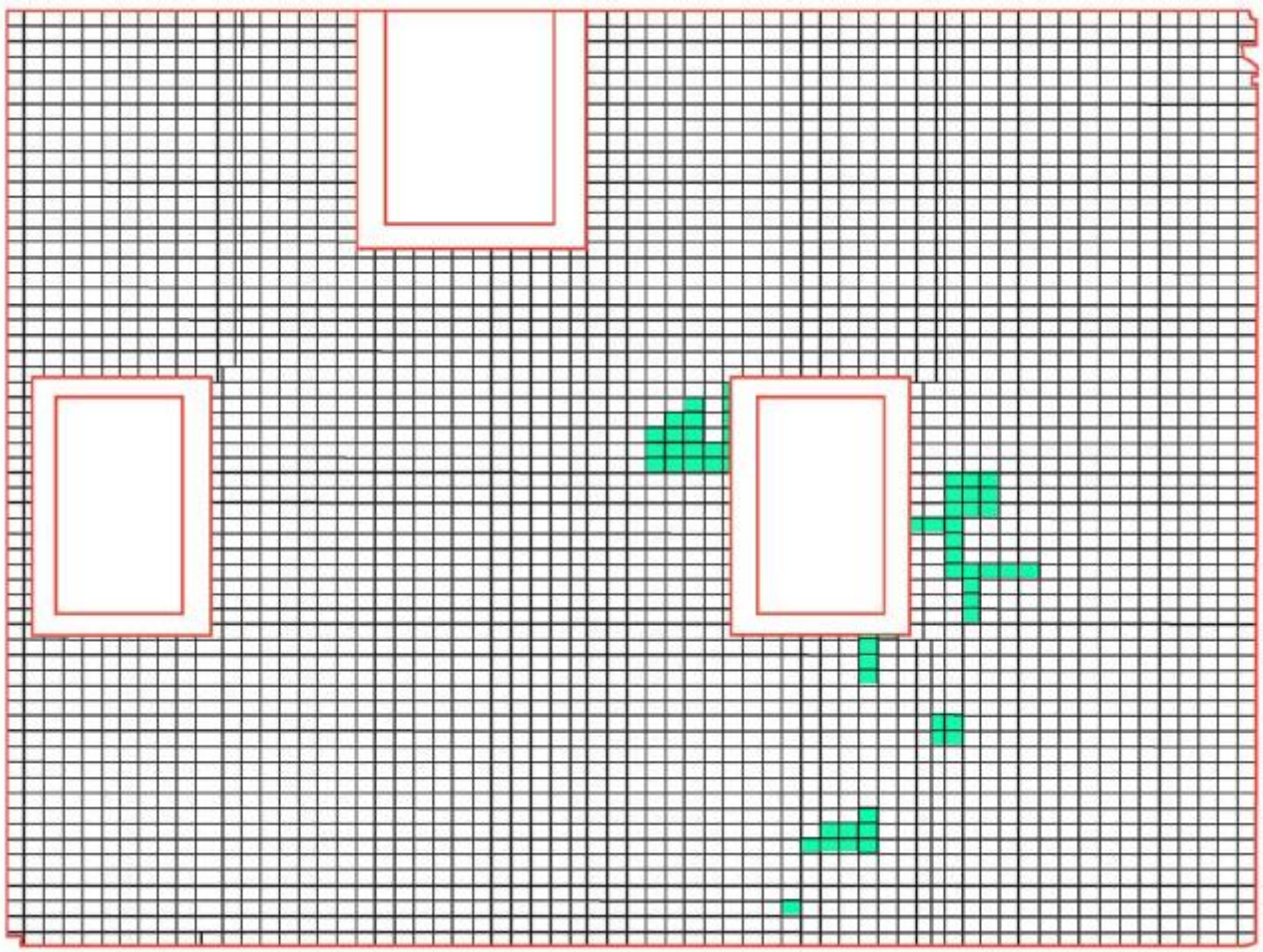
Capela das Almas

PERFURAÇÕES / INJEÇÕES DE CALDAS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Capela-Mor

arqueologia & património
ricardo teixeira & vítor fonseca - arqueologia lda



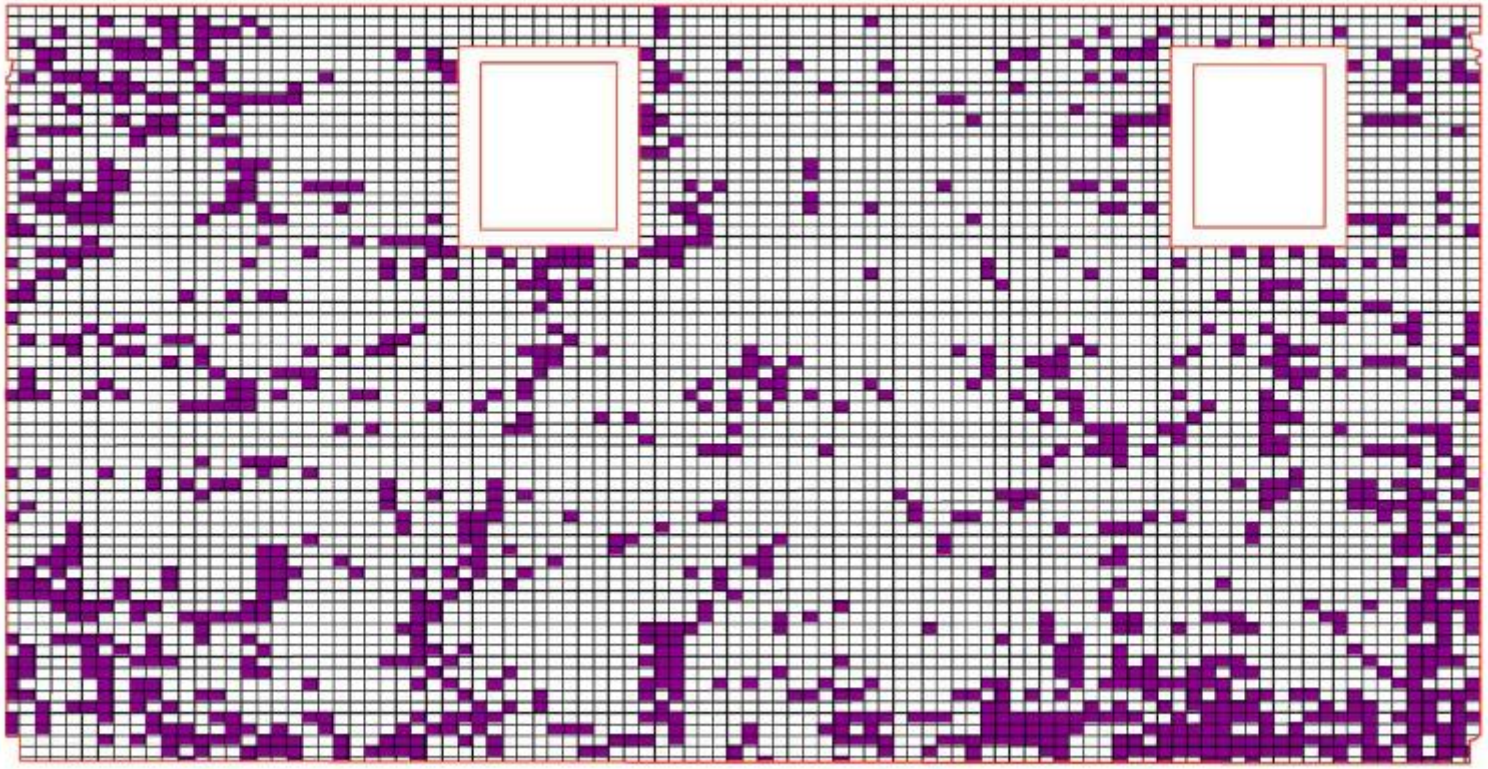
Capela das Almas

REMOÇÕES / REASSENTAMENTOS DE AZULEJOS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Capela-Mor

arqueologia & património
ricardo teixeira & vítor fonseca - arqueologia lda



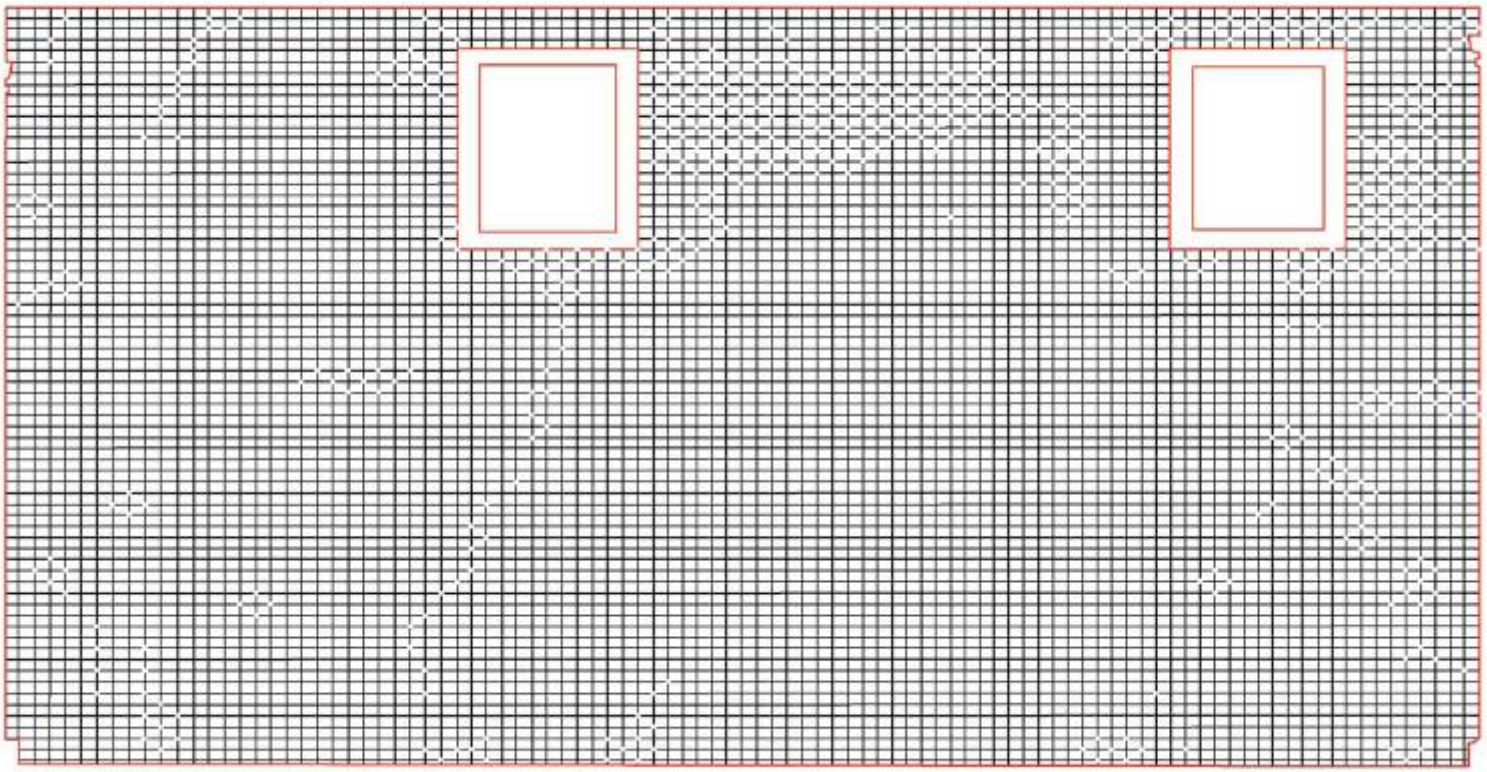
Capela das Almas

REINTEGRAÇÃO VOLUMÉTRICAS E CROMÁTICAS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Nave

arqueologia & património
ricardo teixeira & vítor fonseca - arqueologia lda



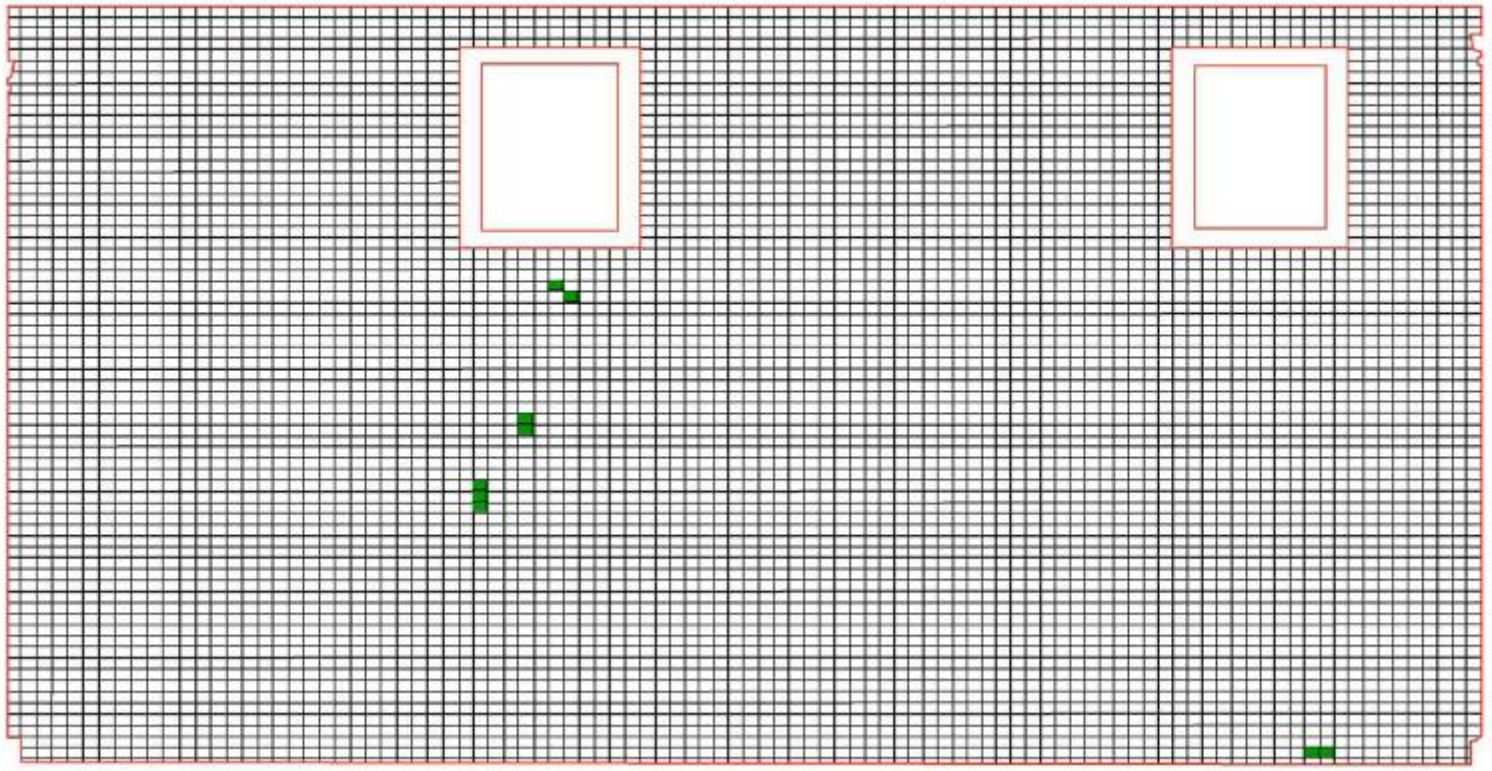
Capela das Almas

PERFURAÇÕES / INJEÇÕES DE CALDAS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Nave

arqueologia & património
ricardo teixeira & vítor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

REMOÇÕES / REASSENTAMENTOS DE AZULEJOS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Nave

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

REINTEGRAÇÃO VOLUMÉTRICAS E CROMÁTICAS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

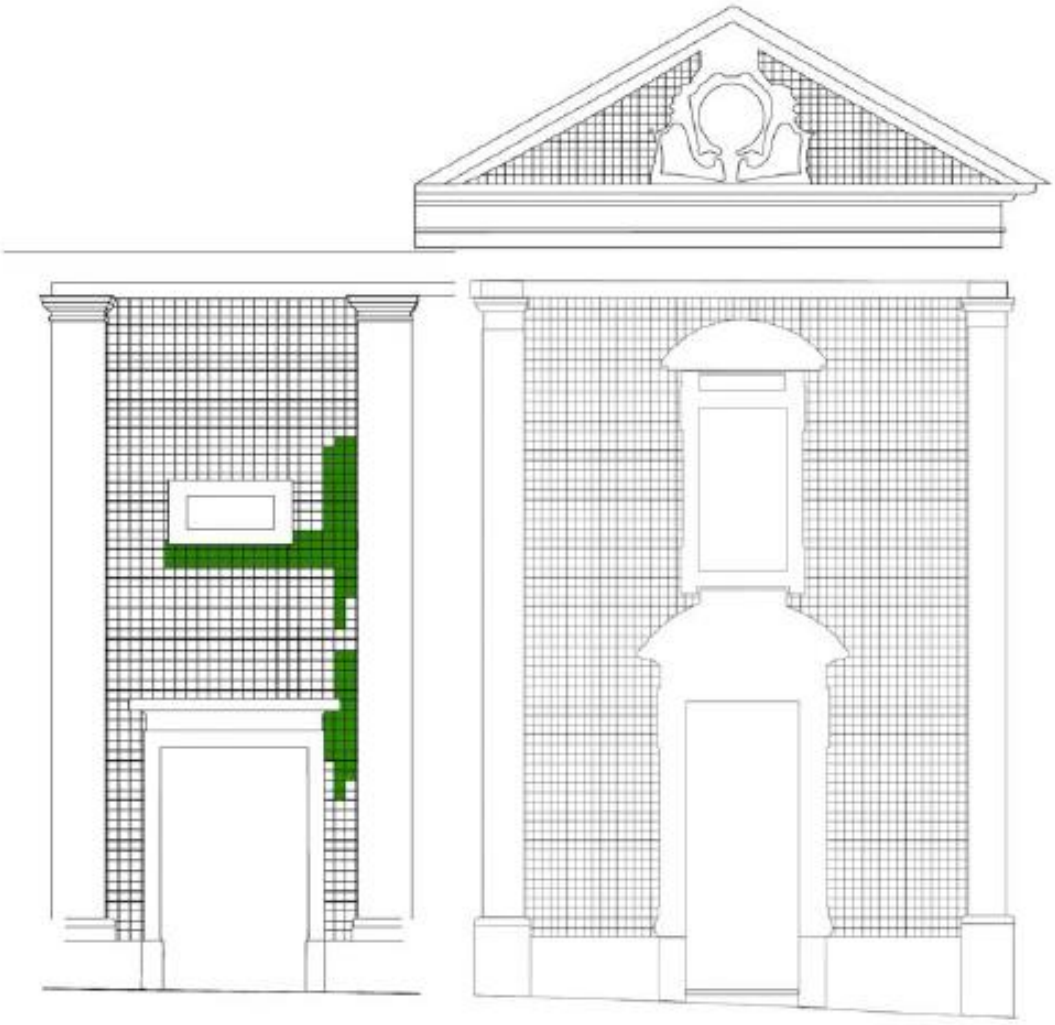
Fachada Principal

Fachada, Frontão e Torre

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas	
PERFURAÇÕES / INJEÇÕES DE CALDAS Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas Remoções/Reassentamentos de azulejos Perfurações / Injeções de caldas consolidantes Azulejos Restaurados em Gabinete	Fachada Principal Fachada, Frontão e Torre arqueologia & património ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

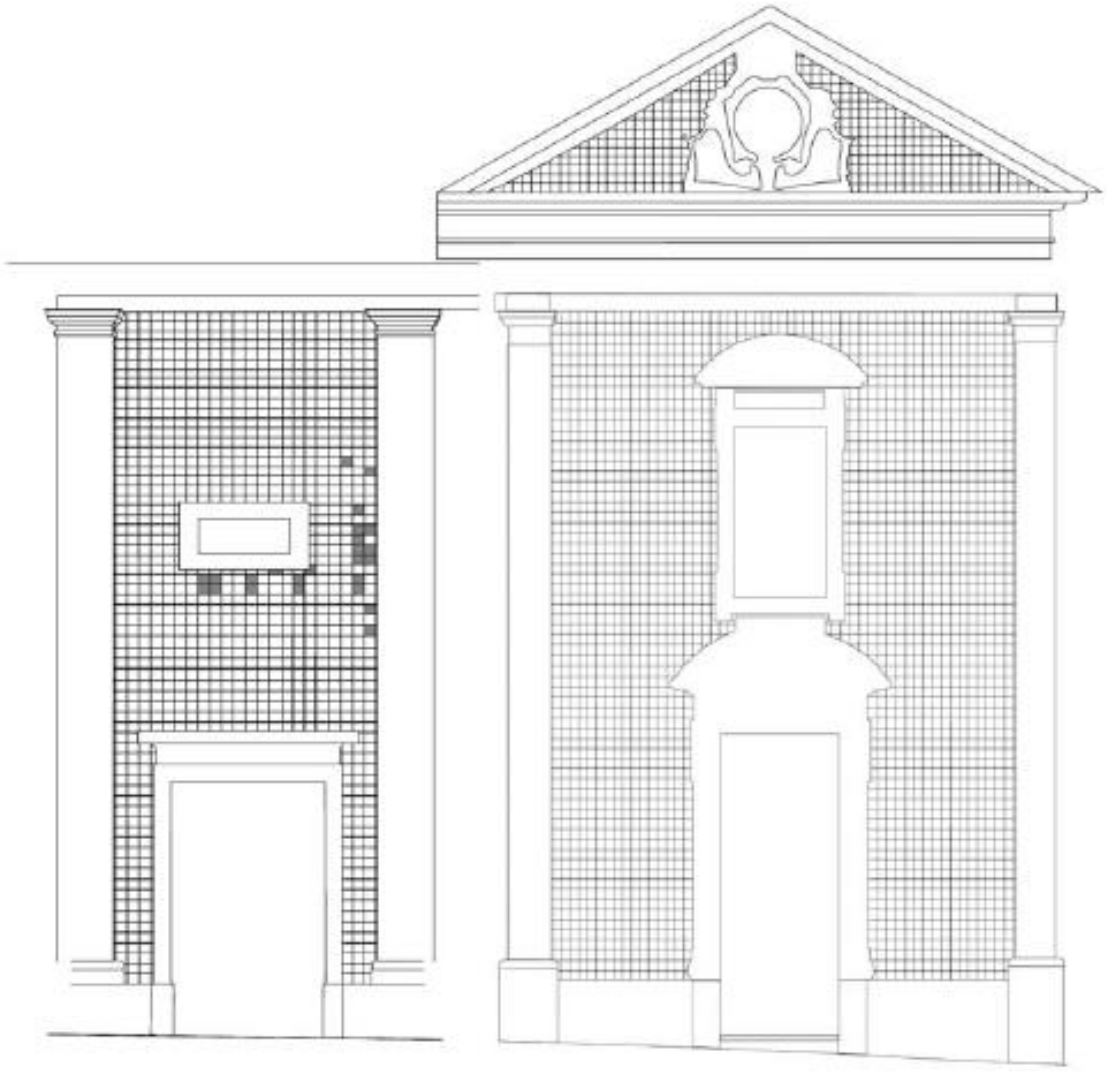
REMOÇÕES / REASSENTAMENTOS DE AZULEJOS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Fachada Principal

Torre

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

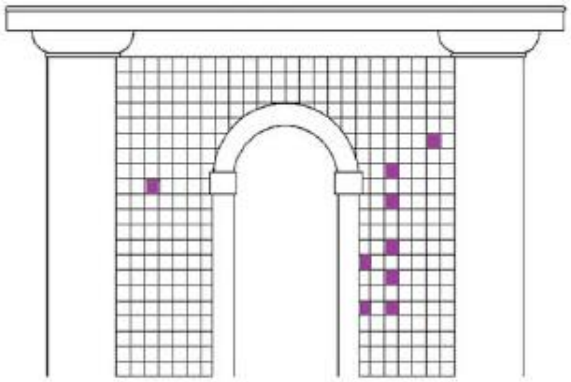
AZULEJOS RESTAURADOS EM GABINETE

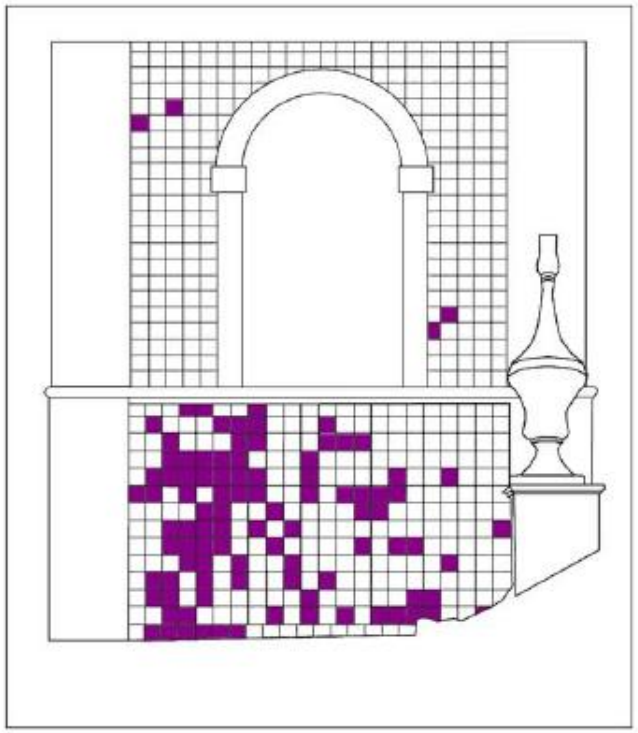
- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

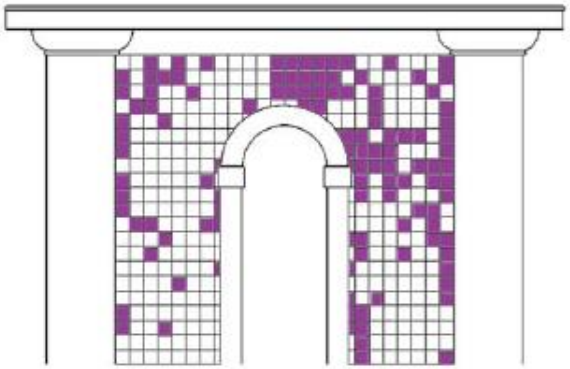
Fachada Principal

Torre

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda







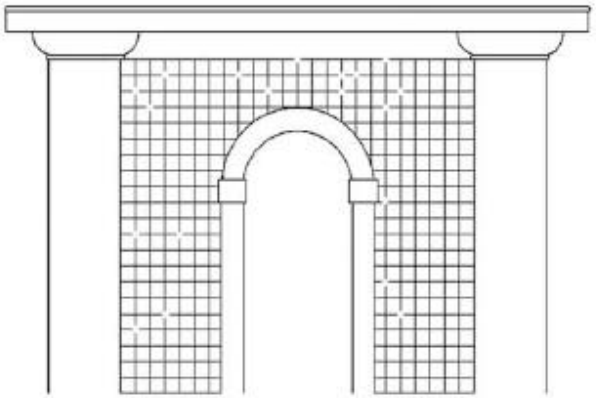
Capela das Almas

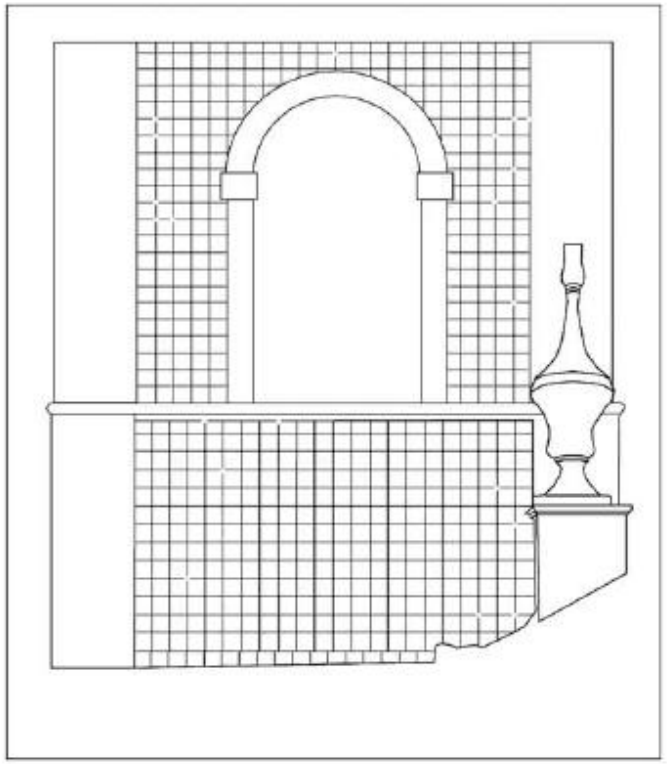
REINTEGRAÇÃO VOLUMÉTRICAS E CROMÁTICAS

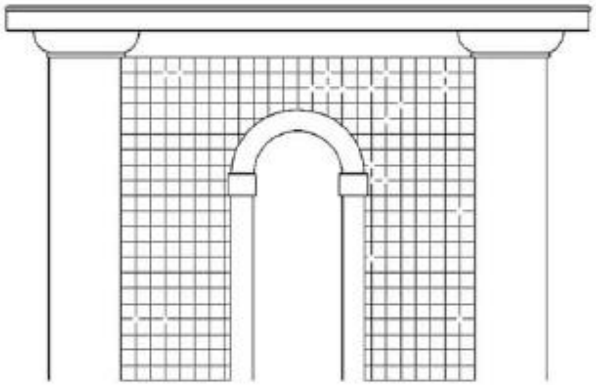
- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Torre Sineira
(Norte, Oeste e Sul)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda







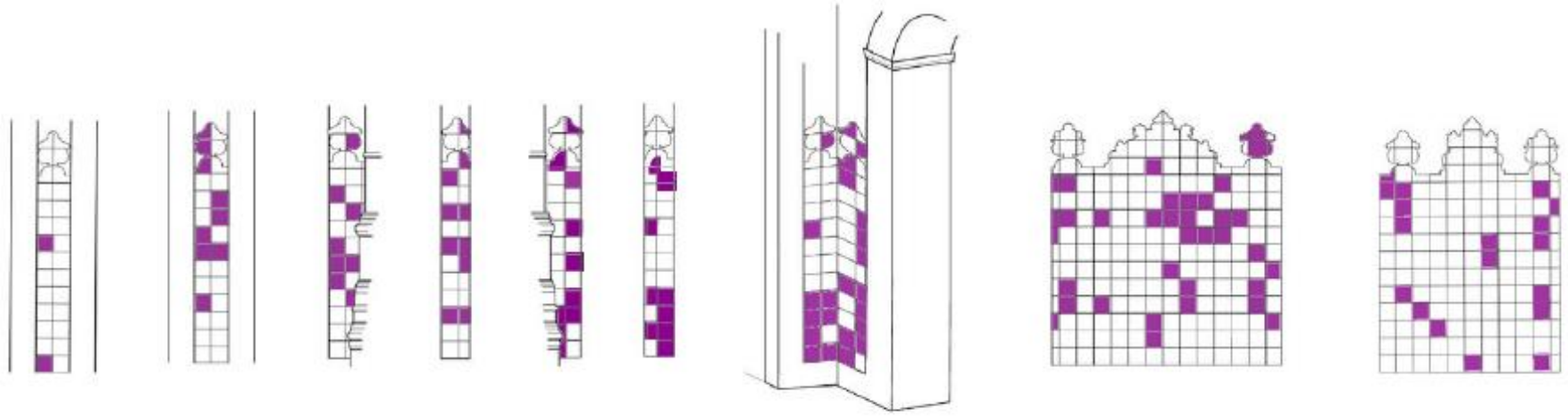
Capela das Almas

PERFURAÇÕES / INJEÇÕES DE CALDAS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Torre Sineira
(Norte, Oeste e Sul)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



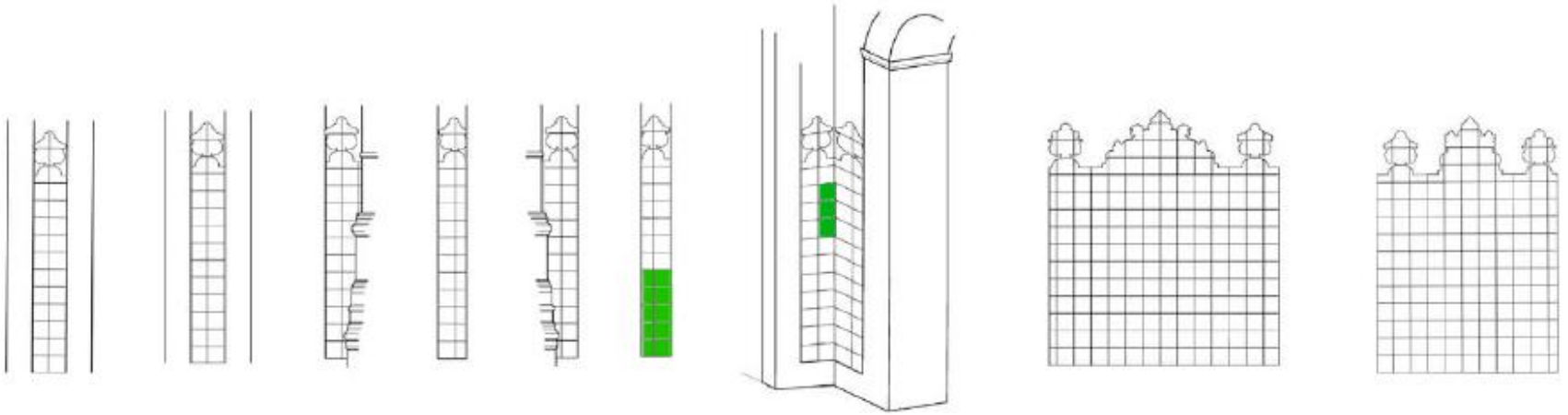
Capela das Almas

REINTEGRAÇÃO VOLUMÉTRICAS E CROMÁTICAS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Capela Interior
(Lado direito)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda



Capela das Almas

REMOÇÕES / REASSENTAMENTOS DE AZULEJOS

- Reintegrações Volumétricas/ Cromáticas
- Remoções/Reassentamentos de azulejos
- Perfurações / Injeções de caldas consolidantes
- Azulejos Restaurados em Gabinete

Capela Interior
(Lado direito)

arqueologia & património
ricardo teixeira & vitor fonseca - arqueologia lda

B

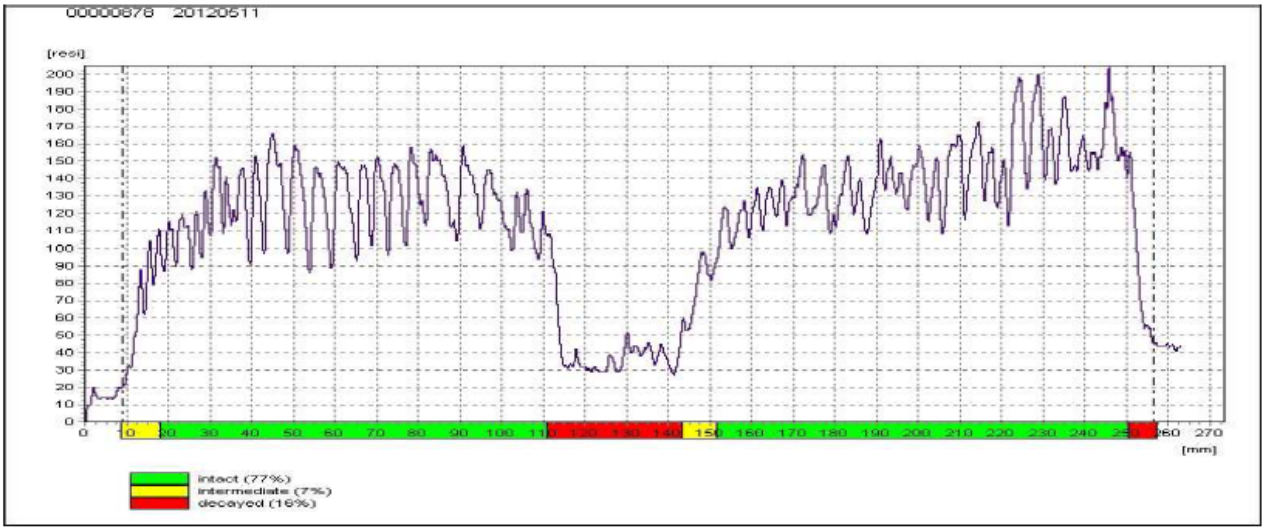
PATOLOGIAS NA ESTRUTURA DE MADEIRA DA COBERTURA DA NAVE

CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E1

ELEMENTO: Linha da Asna A2 – Encontro Sul	**Valor Médio de Resistograph:** 116

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Degradação superficial e no interior da viga.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

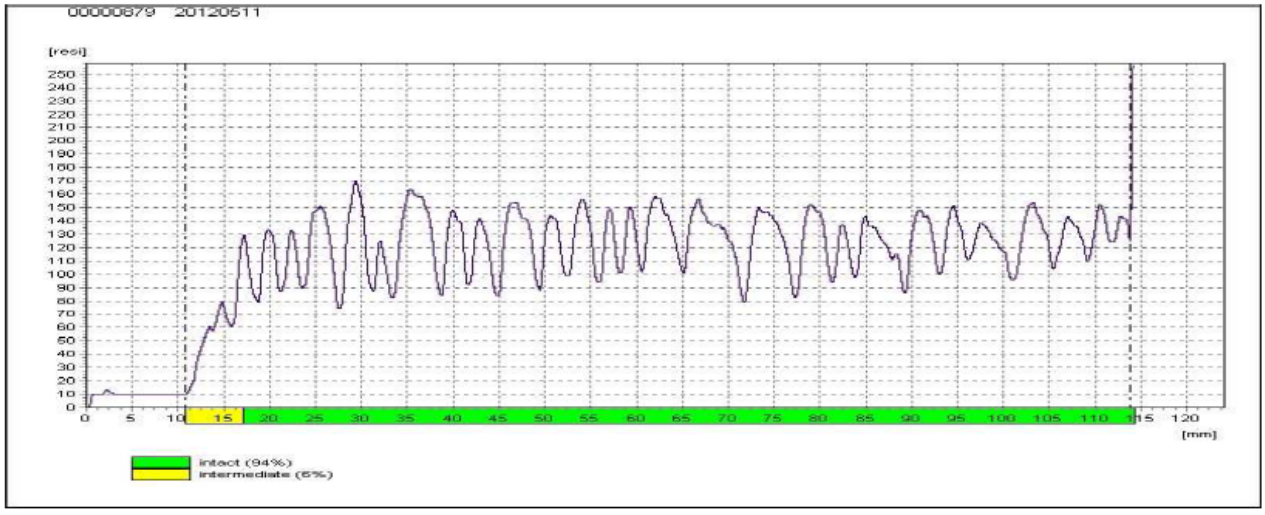


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E2

ELEMENTO: Linha da Asna A3 – Encontro Sul	**Valor Médio de Resistograph:** 121

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Ligeira degradação superficial.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

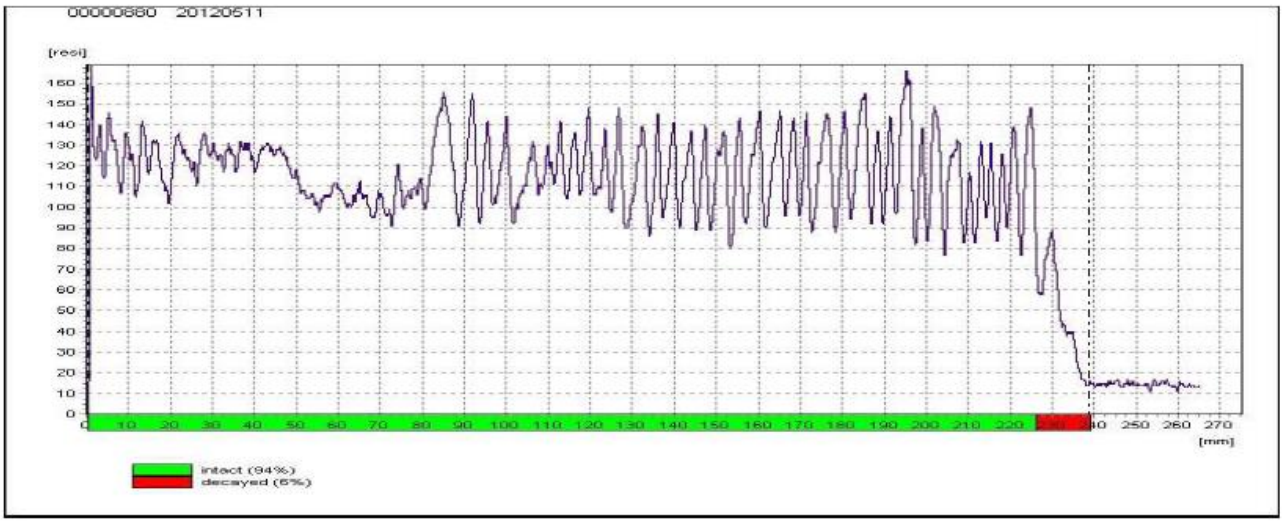


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E3

ELEMENTO: Linha da Asna A3 – Encontro Sul	**Valor Médio de Resistograph:** 113

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Ligeira degradação superficial.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

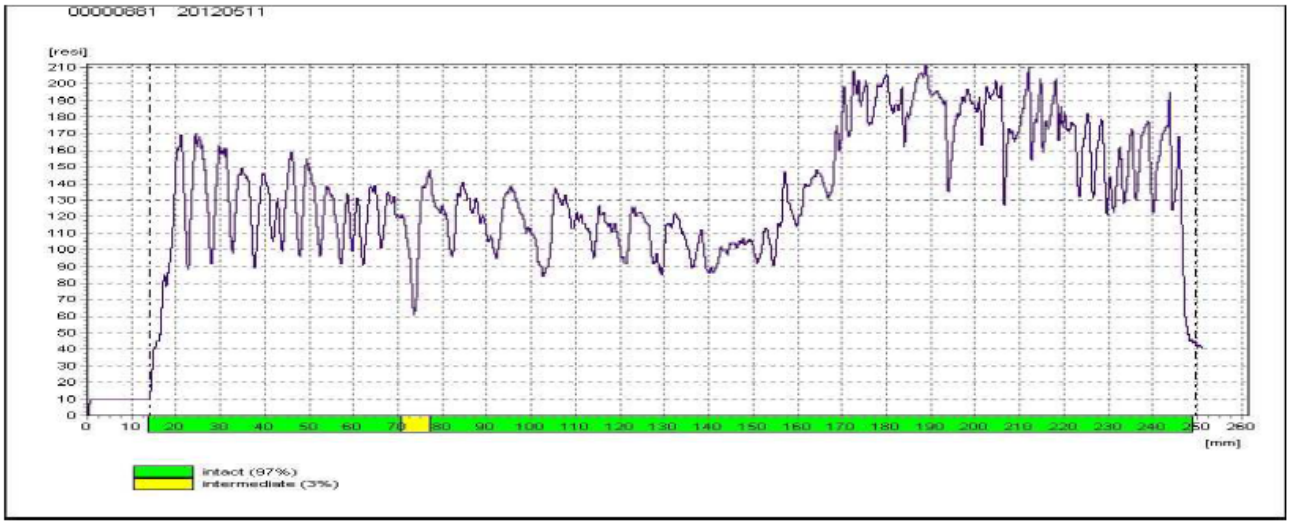


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E4

ELEMENTO: Linha da Asna A4 – Encontro Sul	**Valor Médio de Resistograph:** 135

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Inexistência de degradação da madeira.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

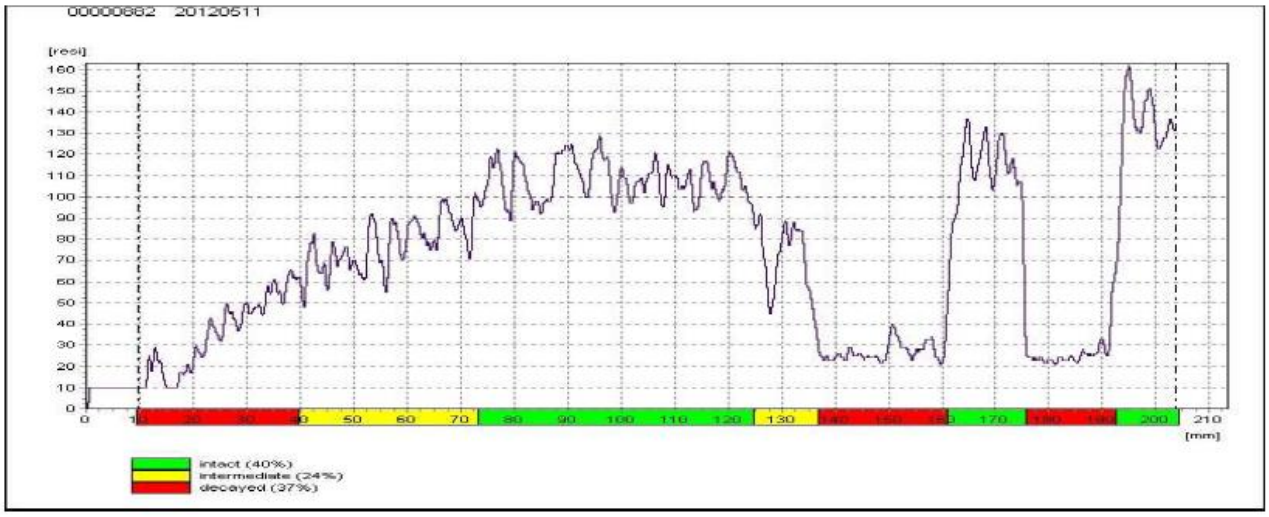


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E5

ELEMENTO: Linha da Asna A5 – Encontro Sul | **Valor Médio de Resistograph:** 74

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Viga degradada ao longo da sua secção transversal.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

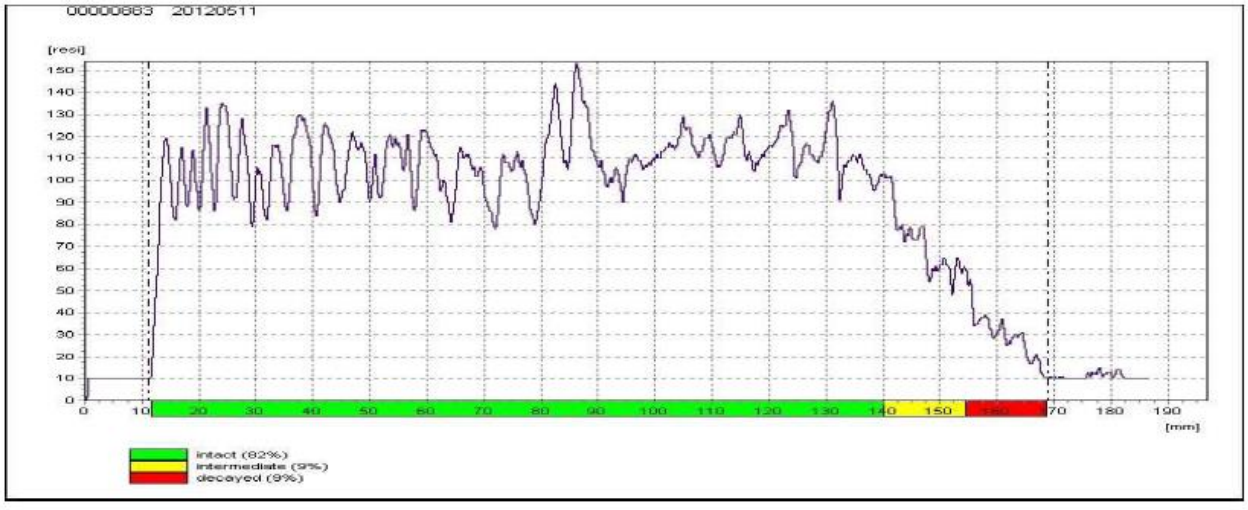


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E6

ELEMENTO: Linha da Asna A5 – Encontro Norte | **Valor Médio de Resistograph:** 98

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Degradação superficial da viga.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

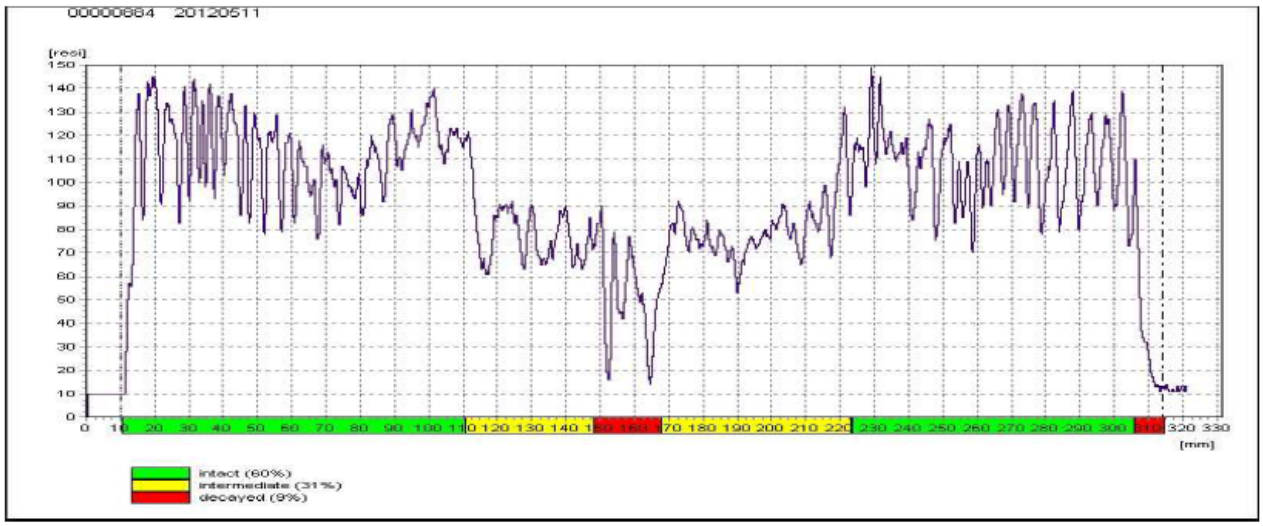


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E7

ELEMENTO: Linha da Asna A4 – Encontro Norte	**Valor Médio de Resistograph:** 95

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Alguma degradação na zona central da linha.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

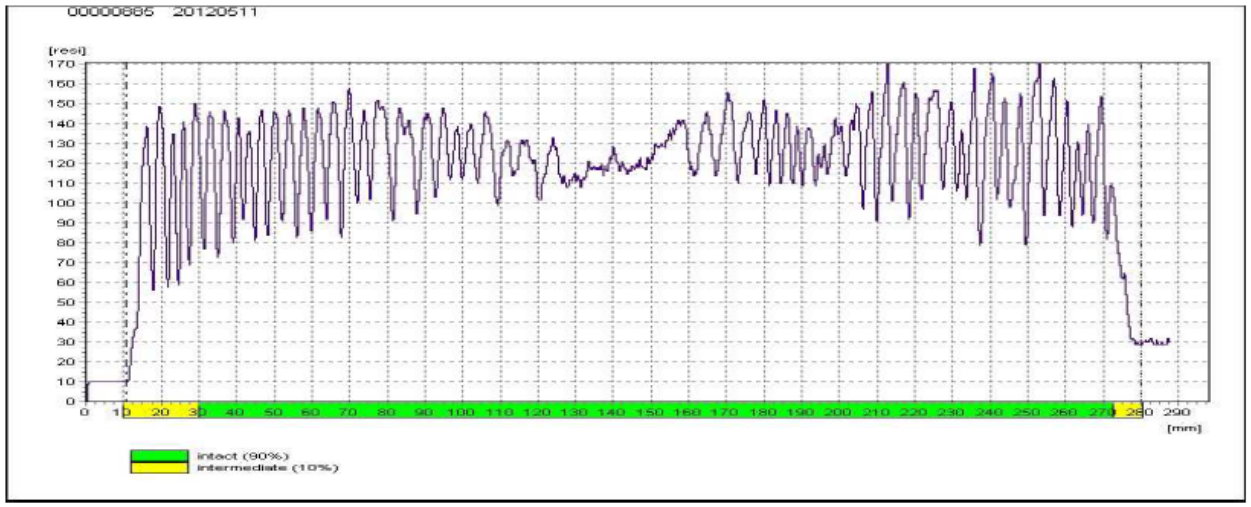


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E8

ELEMENTO: Linha da Asna A3 – Encontro Norte	**Valor Médio de Resistograph:** 121

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Ligeira degradação superficial.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

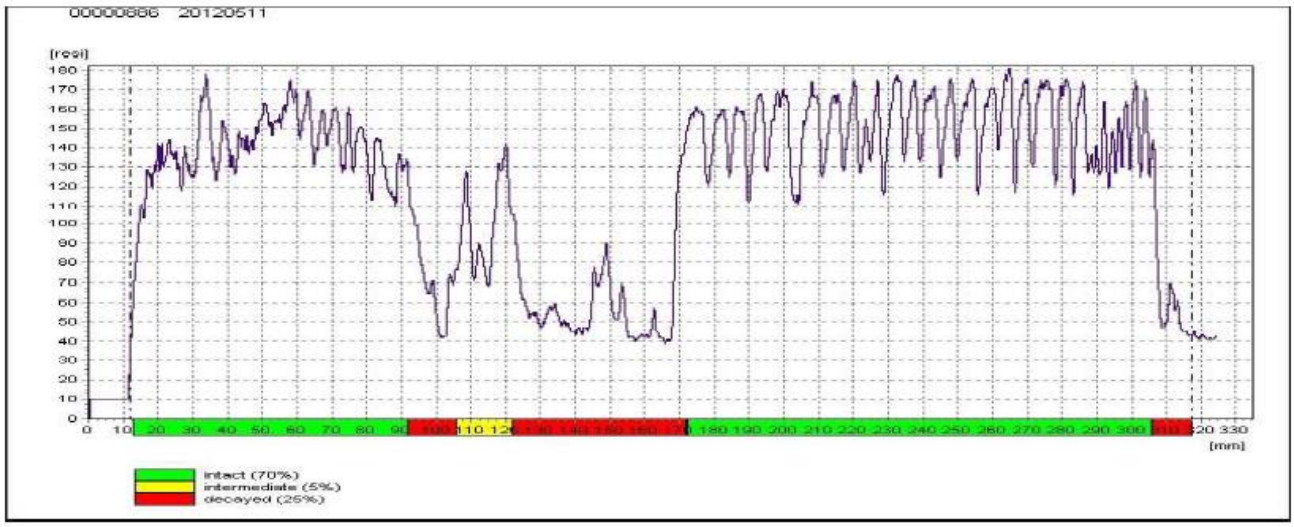


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E9

ELEMENTO: Linha da Asna A2 – Encontro Norte	**Valor Médio de Resistograph:** 124

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Degradação acentuada na zona central da viga.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

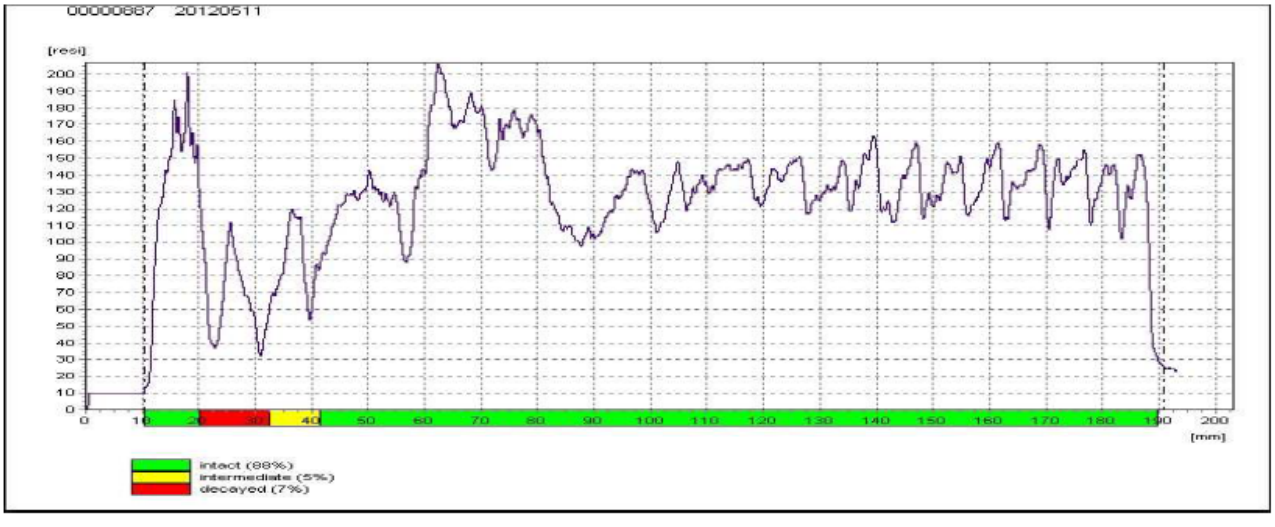


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E10

ELEMENTO: Linha da Asna A1 – Encontro Norte	**Valor Médio de Resistograph:** 128

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Alguma degradação em cerca de 2cm.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

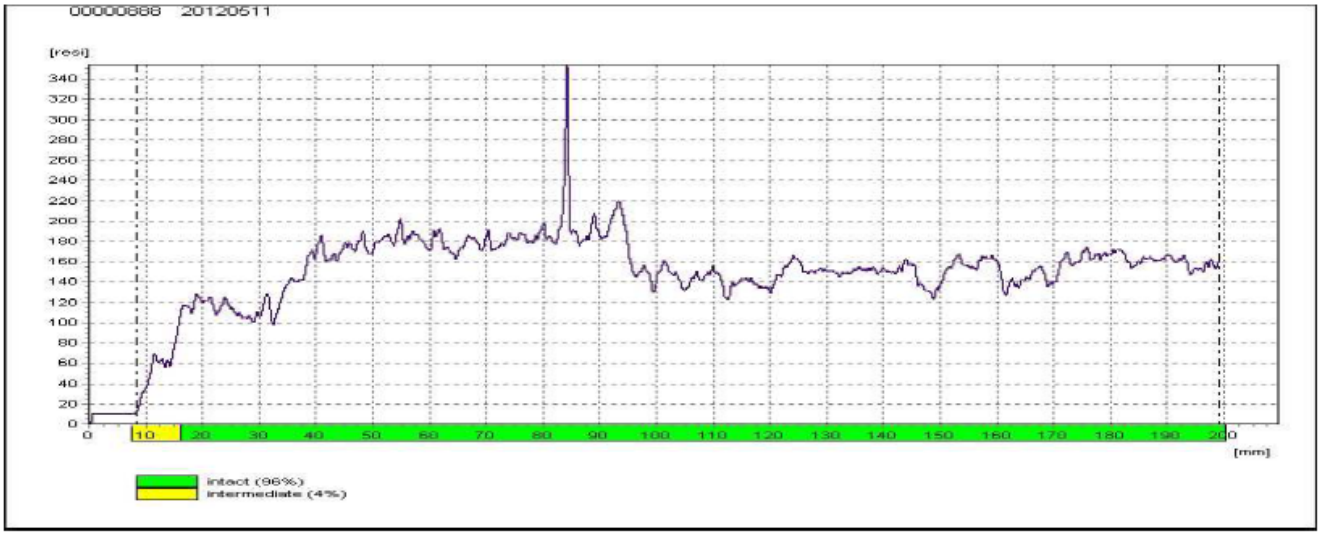


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E11

ELEMENTO: Linha da Asna A1 – Encontro Sul | **Valor Médio de Resistograph:** 153

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Ligeira degradação superficial.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

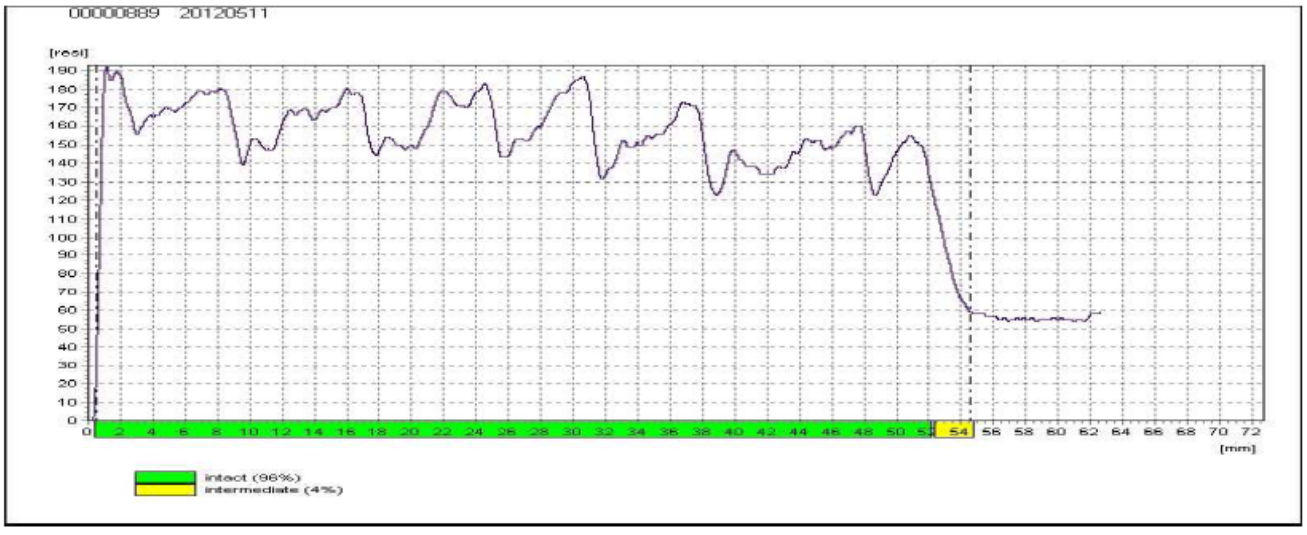


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E12

ELEMENTO: Madre 3 (entre asnas A1 e A2) | **Valor Médio de Resistograph:** 154

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Inexistência de degradação da madeira.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

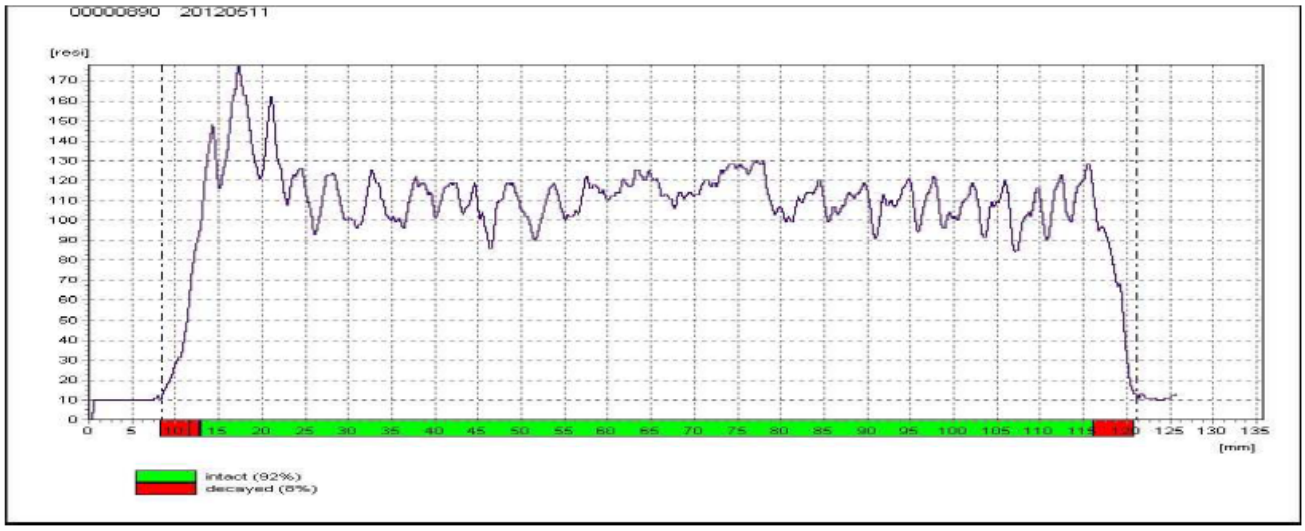


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E13

ELEMENTO: Madre 4 (entre asnas A1 e A2) | **Valor Médio de Resistograph:** 109

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Ligeira degradação superficial.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

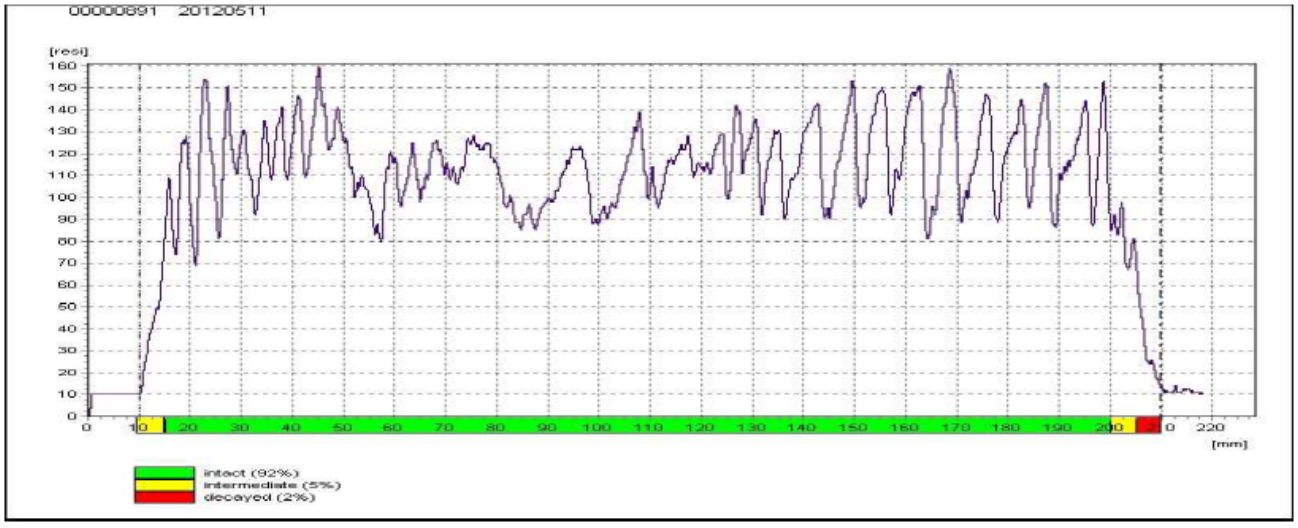


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E14

ELEMENTO: Madre 2 (entre asnas A1 e A2) | **Valor Médio de Resistograph:** 111

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Ligeira degradação superficial.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

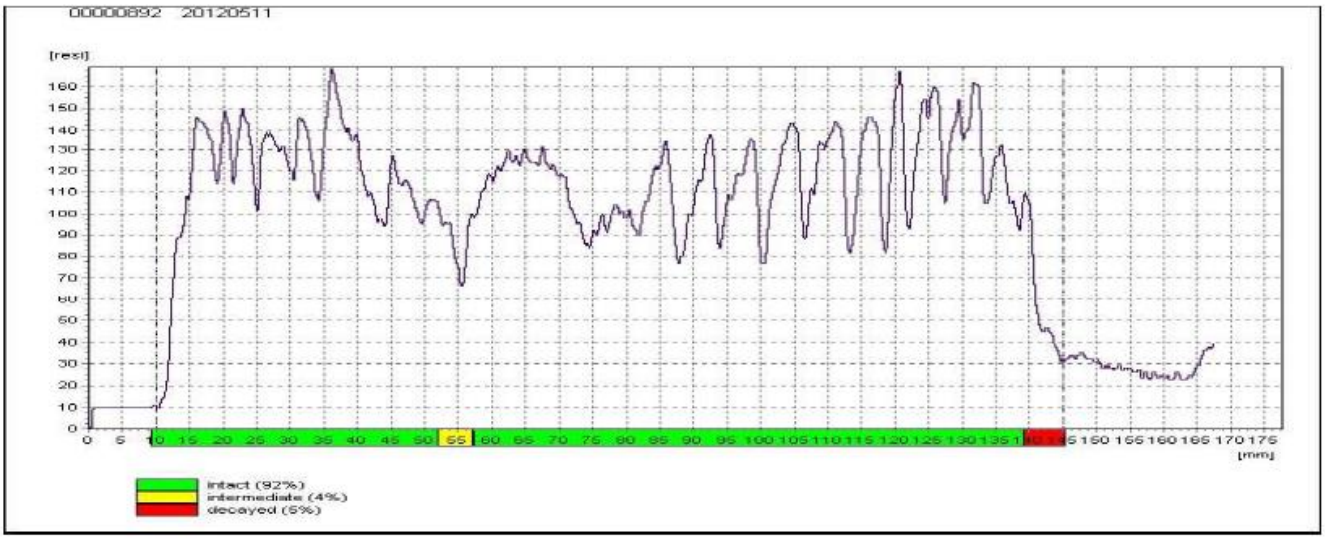


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E15

ELEMENTO: Madre 1 (entre asnas A2 e A3)	**Valor Médio de Resistograph:** 114

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Ligeira degradação superficial da madeira.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

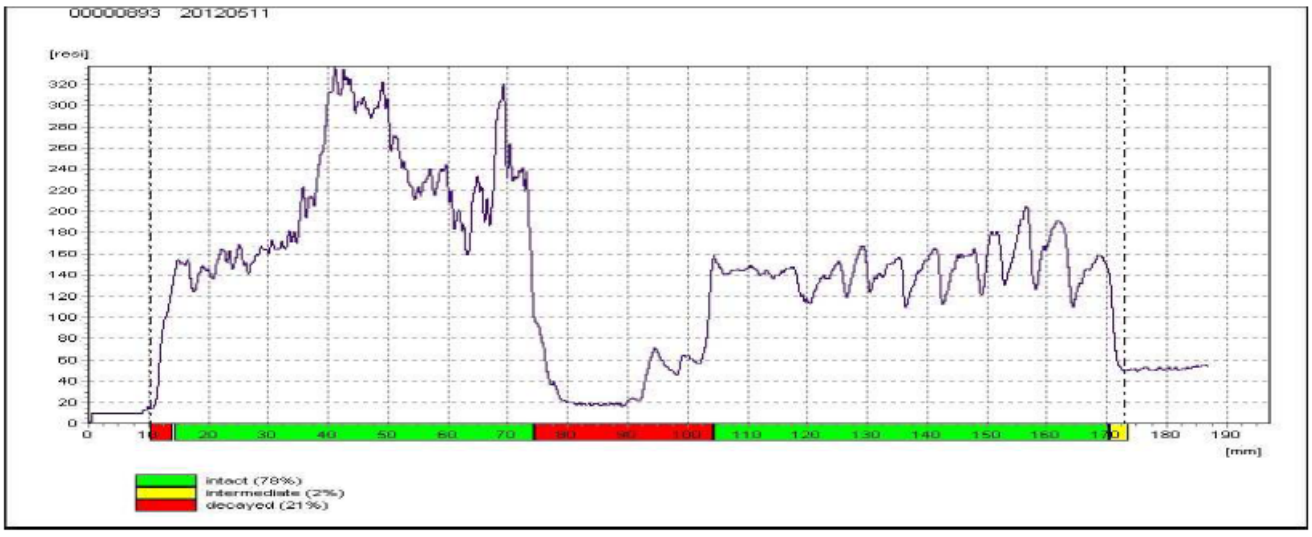


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E16

ELEMENTO: Madre 1 (entre asnas A2 e A3)	**Valor Médio de Resistograph:** 151

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Degradação superficial e no interior da madre.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

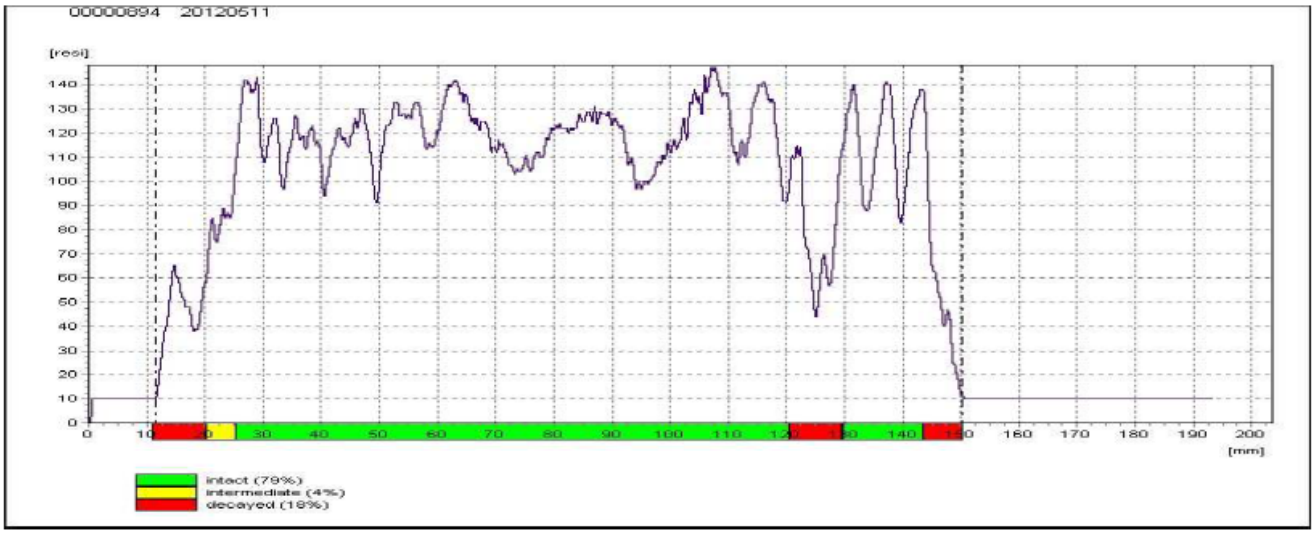


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E17

ELEMENTO: Cumeeira (entre asnas A2 e A3)	**Valor Médio de Resistograph:** 108

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Alguma degradação superficial.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

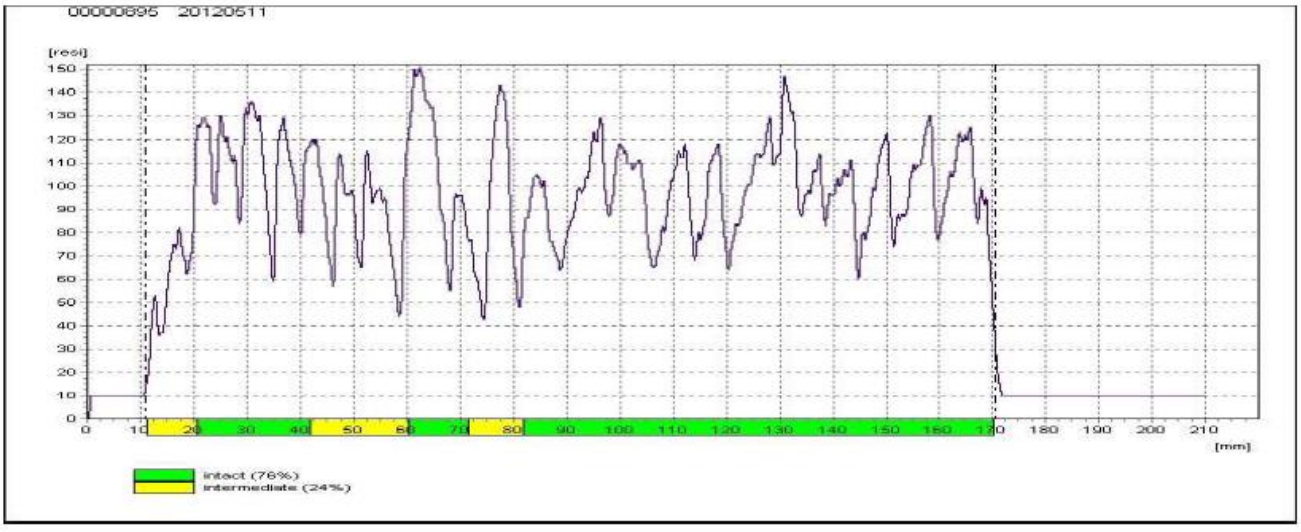


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E18

ELEMENTO: Madre 4 (entre asnas A3 e A4)	**Valor Médio de Resistograph:** 97

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Degradação ligeira da madeira.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

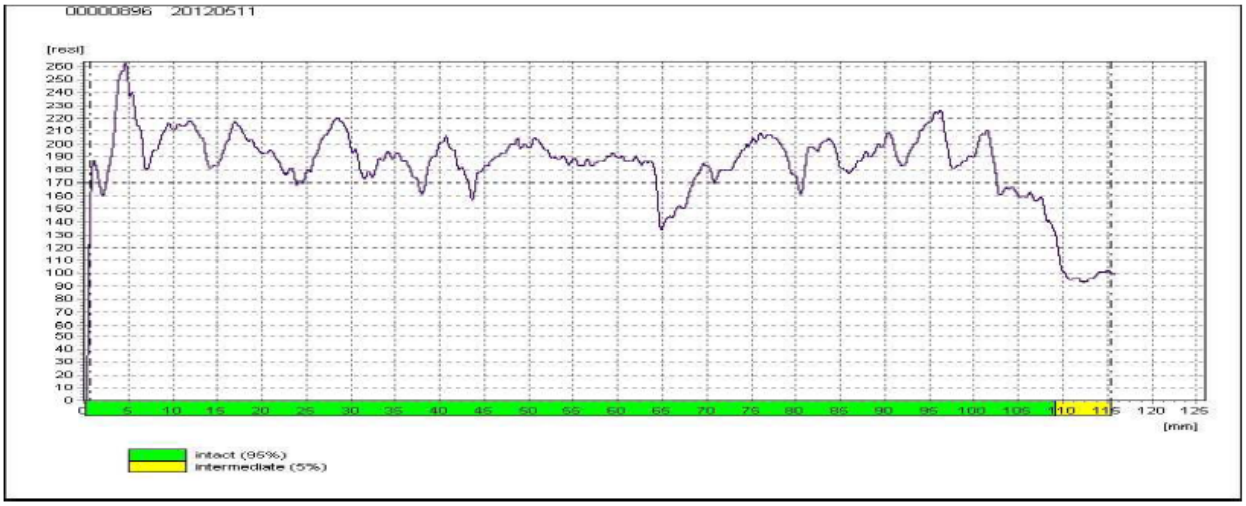


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E19

ELEMENTO: Madre 3 (entre asnas A3 e A4)	**Valor Médio de Resistograph:** 184

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Ligeira degradação superficial.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

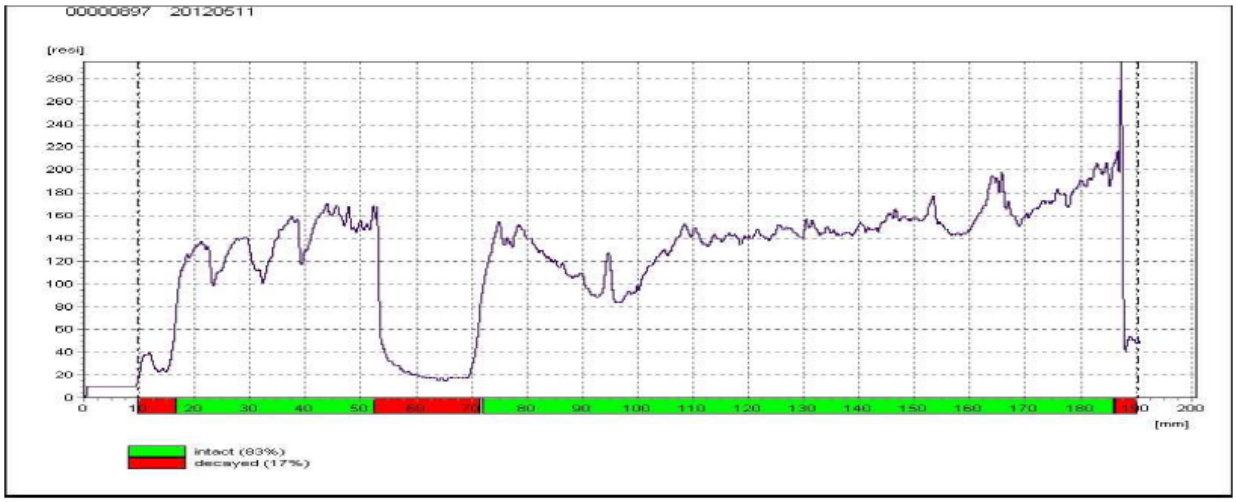


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E20

ELEMENTO: Madre 1 (entre asnas A4 e A5)	**Valor Médio de Resistograph:** 126

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Degradação superficial e no interior da madre.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

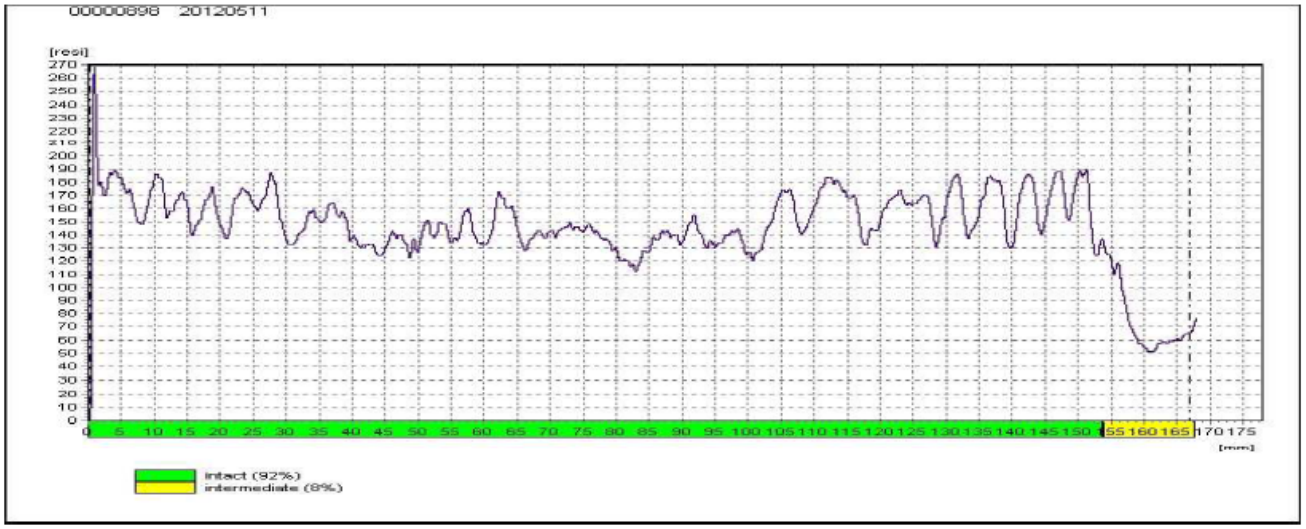


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E21

ELEMENTO: Madre 1 (entre asnas A4 e A5) | **Valor Médio de Resistograph:** 146

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Ligeira degradação superficial da madeira.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

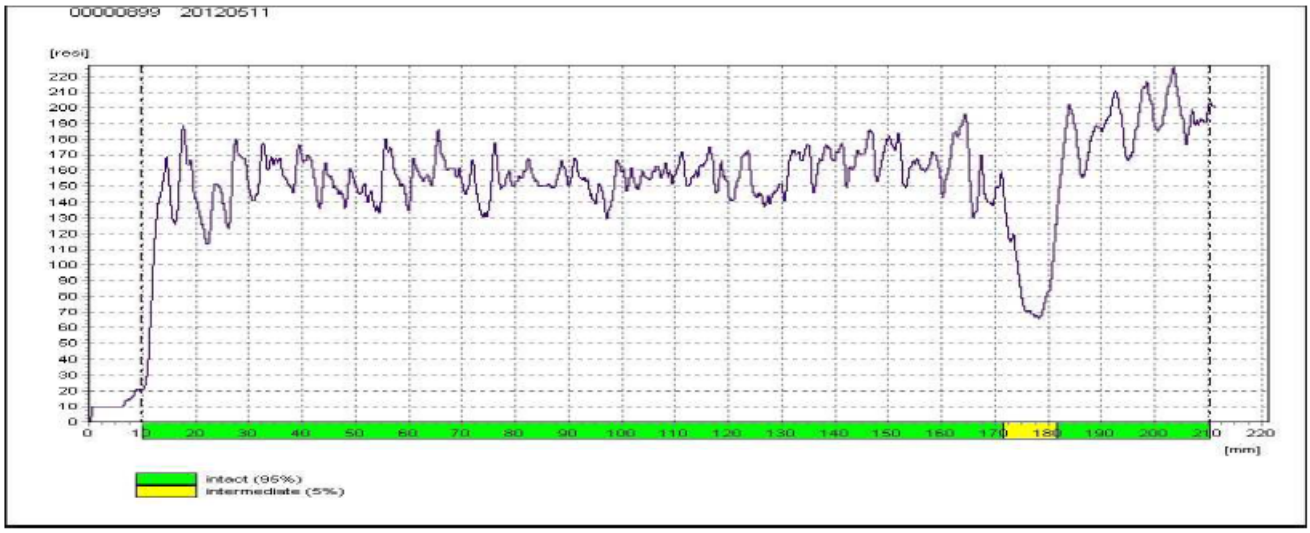


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E22

ELEMENTO: Madre 2 (entre asnas A4 e A5) | **Valor Médio de Resistograph:** 157

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Inexistência de degradação da madeira.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

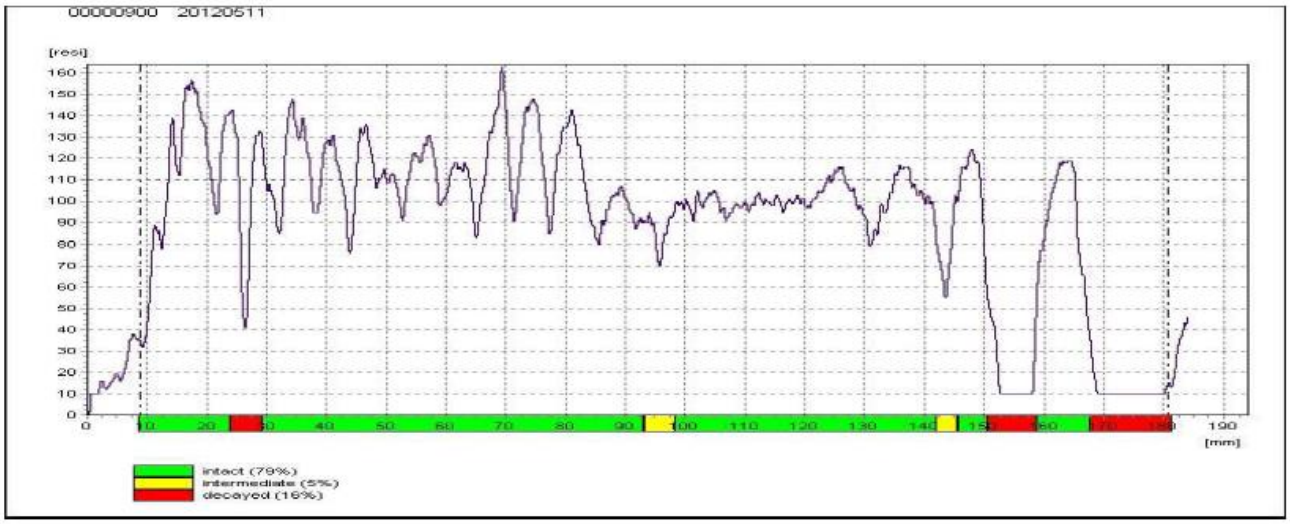


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E23

ELEMENTO: Cumeeira (entre asnas A4 e A5)	**Valor Médio de Resistograph:** 95

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Alguma degradação superficial da madeira.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®

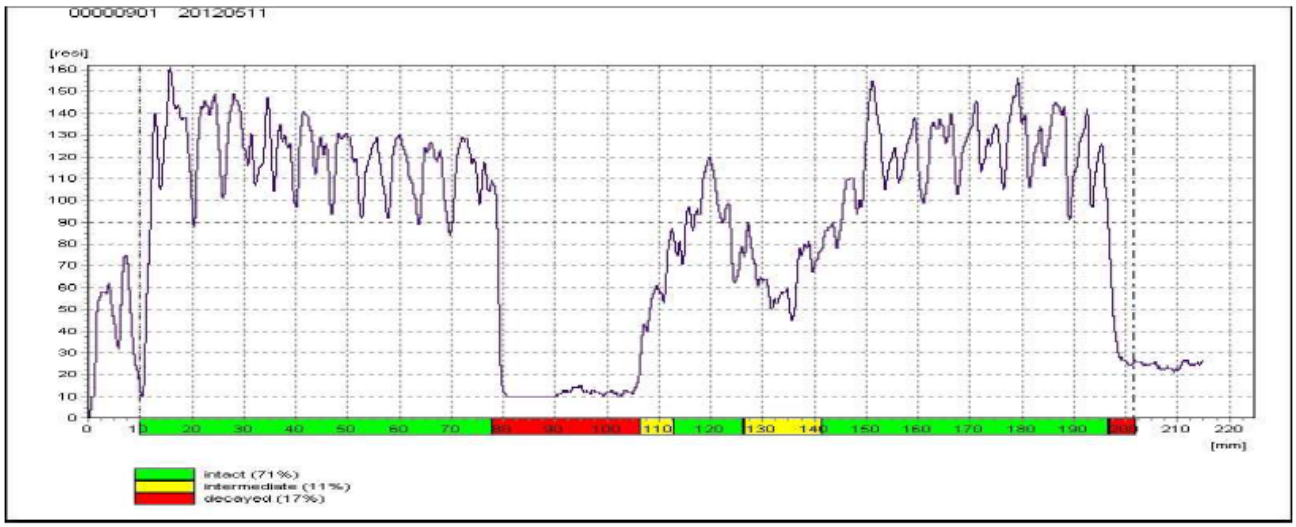


CAPELA DAS ALMAS - ENSAIOS RESISTOGRAPH® - E24

ELEMENTO: Cumeeira (entre asnas A4 e A5)	**Valor Médio de Resistograph:** 94

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: Degradação superficial e no interior da cumeeira.

REGISTOS OBTIDOS COM O RESISTOGRAPH®



C.1

INTERVENÇÕES DE RESTAURO NOS AZULEJOS APÓS A CONTRUÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRO DO BOLHÃO



Fig.1 - Pré-fixação de vidrados



Fig.2 – Proteção com tela de gaze



Fig.3 – Limpeza química



Fig. 4 – Remoção de argamassa das juntas



Fig.5 – Fechamento de juntas e de fissuras



Fig.6 – Remoção de excessos de argamassa



Fig.7 –Realização das Perfurações nas juntas



Fig.8 – Injeção das Caldas consolidantes



Fig.9 – Correção volumétrica do material cerâmico



Fig.10– Remoção de algumas unidades de azulejo



Fig.11 – Proteção com contrafortes de tela de gaze



Fig.12 – Remoção da argamassa de suporte



Fig.13 – Remoção dos vestígios de argamassa no azulejo

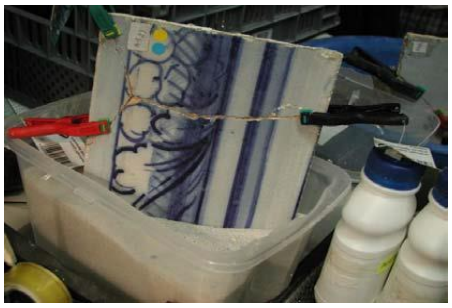


Fig.14 – Colagem de unidades fraturadas



Fig.15 – Reintegração volumétrica



Fig.16 – Humedecimento da argamassa de suporte



Fig.17 – Aplicação da argamassa de enchimento



Fig.18 – Humedecimento dos azulejos antes do reassentamento



Fig.19 – Aplicação da argamassa de reassentamento



Fig.20 – Reassentamento dos azulejos



Fig.21 – Fecho definito das juntas



Fig.22 – Remoção dos vestígios de argamassa



Fig.23 – Reintegração cromática



Fig.24 – Remoção das proteções das cantarias e dos andaimes. Limpezas finais.

C.2

MONTAGEM DA INSTRUMENTAÇÃO



Fig.1 - Colocação do acelerómetro Acc_4



Fig.2 – Colocação do acelerómetro Acc_4



Fig.3– Acelerómetros exteriores



Fig. 4 – Preparação para colocação da proteção dos acelerómetros exteriores



Fig.5 – Colocação da proteção dos acelerómetros exteriores



Fig.6 – Proteção dos acelerómetros exteriores



Fig.7– Posição do acelerómetro Acc_6



Fig.8 – Posição do acelerómetro Acc_6



Fig.9 – Posição do acelerómetro Acc_6



Fig.10- Posição do acelerómetro Acc_5



Fig.11 – Posição do acelerómetro Acc_1



Fig.12 – Posição do acelerómetro Acc_2



Fig.13 – Passagem dos cabos exteriores



Fig.14 – Colocação das bobinas dos acelerómetros Acc_0, Acc_2, Acc_3 e Acc_4



Fig.15 – Posição do acelerómetro Acc_0



Fig.16 – Colocação do acelerómetro Acc_7



Fig.17 – Sistema de aquisição



Fig.18 – Sistema de aquisição

D

REGISTOS DOS ACELERÓMETROS

	Horas	Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 4	17:49 - 19:09	0.0001348	0.0007088	0.0001236	0.0001467	0.000317	0.0001308	0.0005454	0.00022
	19:09 - 20:18	0.0001358	0.001661	0.002349	0.002426	0.001389	0.002702	0.003399	0.000159
	20:18 - 21:27	0.0001052	0.00007261	0.0001491	0.00004278	0.000651	0.00007292	0.00007525	0.000107
	21:27 - 22:34	0.0001173	0.00006141	0.0002052	0.00005236	0.000598	0.0001058	0.00006649	0.000189
	22:34 - 23:42	0.0001465	0.00006789	0.0001883	0.00002543	0.000299	0.00006753	0.00009618	0.000108
		Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 5	16:48 - 17:57	0.0002086	0.002211	0.00122	0.0009922	0.001103	0.0009643	0.001528	0.000145
	17:57 - 19:05	0.0001037	0.0002606	0.00009749	0.0004887	0.000336	0.0001451	0.0003438	0.000198
	19:05 - 20:15	0.00013	0.0003702	0.0001461	0.001685	0.000738	0.0001475	0.0002028	0.000217
	20:15 - 21:23	0.000123	0.0002729	0.0001769	0.0005975	0.000193	0.0001914	0.000294	0.000104
	21:23 - 22:29	0.00009172	0.00006987	0.0001391	0.001832	0.000402	0.00009376	0.0000606	0.000129
	22:29 - 23:37	0.0009199	0.0004369	0.0006496	0.00008337	0.00347	0.0003099	0.00123	0.002271
		Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 6	16:24 - 17:32	0.00009162	0.00007797	0.0001742	0.00004965	0.000326	0.00007447	0.00007985	0.000107
	17:32 - 18:40	0.000172	0.0001582	0.0001034	0.0000847	0.000256	0.0001081	0.0001078	0.00023
	18:40 - 19:48	0.0001005	0.0006544	0.000235	0.0002251	0.000632	0.0002081	0.0006249	0.000181
	19:48 - 20:55	0.0001269	0.00007506	0.00009264	0.00009786	0.000359	0.0001283	0.0000847	0.000138
	20:55 - 22:02	0.000156	0.00008507	0.0002459	0.00008129	0.000785	0.0001321	0.00006888	0.000108
	22:02 - 23:08	0.0001587	0.00006145	0.0001785	0.0000533	0.000828	0.0001085	0.0001256	0.000352
	23:08 - 00:15	0.0001979	0.0001429	0.0002434	0.00005759	0.001205	0.0001262	0.00006845	0.000289
		Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 7	16:01 - 17:09	0.000185	0.0006866	0.0002927	0.0003275	0.000714	0.001149	0.0004097	0.000152
	17:09 - 18:18	0.0001282	0.002239	0.002525	0.001159	0.000754	0.0005991	0.003565	0.000172
	18:18 - 19:26	0.0001814	0.00844	0.003997	0.001076	0.001213	0.002071	0.007914	0.00033
	19:26 - 20:33	0.00009921	0.0001265	0.0004664	0.00005742	0.000829	0.0001175	0.00008977	0.000148
	20:33 - 21:40	0.0001211	0.00007885	0.0001125	0.00004988	0.000643	0.0001044	0.0001344	0.000132
	21:40 - 22:46	0.00006713	0.00005663	0.00008064	0.00004932	0.001081	0.00005409	0.0001082	0.000165
	22:46 - 23:53	0.0001023	0.00008819	0.0003315	0.0000493	0.000937	0.00008499	0.00008411	0.000149
		Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 8	18:31 - 19:40	0.0002079	0.0002251	0.0001576	0.0001174	0.001496	0.0007891	0.0003893	0.000369
	19:40 - 20:48	0.0001991	0.00007208	0.000245	0.0004299	0.003497	0.0001652	0.00009642	0.000162
	20:48 - 21:55	0.0004087	0.0001334	0.0002222	0.0001597	0.000883	0.0001501	0.0002317	0.000135
	21:55 - 23:03	0.00009812	0.000947	0.0003222	0.0001731	0.00104	0.0001206	0.0006128	0.000123
	23:03 - 00:10	0.0001522	0.00005197	0.00008575	0.0001034	0.000288	0.0001277	0.0008027	0.000623

*Horas a vermelho contêm erros de aquisição

	Horas	Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 5	07:35 - 08:44	0.0004233	0.0002311	0.0004419	0.0001298	0.002041	0.0002001	0.0002714	0.0003787
	08:44 - 09:54	0.00008056	0.0001859	0.0001025	0.0001164	0.000219	0.0001442	0.0006164	0.0001063
	09:54 - 11:03	0.0001647	0.0002104	0.0001408	0.000102	0.00042	0.0003027	0.0002293	0.0001252
	11:03 - 12:14	0.0001716	0.003866	0.002821	0.002436	0.001386	0.002158	0.0004049	0.0002702
	12:14 - 13:22	0.0001465	0.0003261	0.0001619	0.0001	0.000323	0.0001406	0.0005247	0.0003216
	13:22 - 14:31	0.0001269	0.0001025	0.0001296	0.00007065	0.000207	0.0001846	0.0001118	0.0002387
	14:31 - 15:09	0.0000682	0.0002528	0.00008229	0.0003111	0.000124	0.00007986	0.0001105	0.0003234
	15:09 - 16:48	0.0001645	0.0005212	0.0005225	0.0001158	0.000911	0.0004135	0.000894	0.00014
		Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 6	07:24 - 08:32	0.0001055	0.0004697	0.0004095	0.000378	0.000425	0.0002367	0.0002685	0.0000941
	08:32 - 09:00	0.000098	0.0002448	0.0001296	0.00008988	0.000227	0.0001407	0.0001004	0.0001395
	09:00 - 10:47	0.0001217	0.003957	0.002028	0.003139	0.001557	0.003072	0.002436	0.000183
	10:47 - 11:55	0.0001143	0.000348	0.0001292	0.0002122	0.000259	0.000167	0.0001187	0.00025
	11:55 - 14:10	0.0003663	0.00009646	0.0003382	0.001889	0.000742	0.0001022	0.0001177	0.0001984
	14:10 - 15:17	0.0001177	0.00009787	0.0001297	0.003141	0.00028	0.0001367	0.0000958	0.0001226
	15:17 - 16:24	0.00009829	0.0001675	0.0004389	0.00004744	0.000997	0.00008719	0.00008838	0.0001664
		Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 7	08:00 - 09:09	0.0001374	0.0002099	0.0001418	0.0001398	0.000335	0.0001321	0.000279	0.0001193
	09:09 - 10:17	0.000107	0.00021	0.000191	0.0001184	0.000333	0.0001165	0.0003853	0.0002002
	10:17 - 11:26	0.0002188	0.0003655	0.0001126	0.0001151	0.000258	0.0002615	0.0002489	0.0002232
	11:26 - 12:34	0.0002817	0.0004237	0.0007442	0.00012	0.000994	0.0001679	0.0005357	0.0001505
	12:34 - 13:43	0.0001206	0.0001839	0.0006126	0.0001085	0.001462	0.000134	0.000289	0.0001428
	13:43 - 14:51	0.0001111	0.0001768	0.0001466	0.0001143	0.000443	0.0001136	0.0002541	0.0001673
	14:51 - 16:01	0.0001306	0.0002152	0.0002447	0.0001096	0.001246	0.0001481	0.0002516	0.0001147
		Acc_0	Acc_1	Acc_2	Acc_3	Acc_4	Acc_5	Acc_6	Acc_7
Dia 8	07:36 - 08:44	0.0001245	0.0002487	0.0001579	0.000116	0.000673	0.000137	0.0002888	0.000214
	08:44 - 09:53	0.00009543	0.0002165	0.0001148	0.00009812	0.000629	0.0001516	0.0003369	0.0004038
	09:53 - 11:01	0.0001737	0.0002269	0.0002371	0.0001176	0.000891	0.0001837	0.0003075	0.0002013
	11:01 - 12:10	0.0001231	0.0001964	0.0001076	0.0001301	0.000506	0.0002031	0.000252	0.0002179
	12:10 - 13:19	0.00009997	0.001133	0.0001544	0.0001173	0.002733	0.0002801	0.0002701	0.0001207
	13:19 - 14:28	0.0000967	0.0002092	0.0001561	0.0001265	0.000916	0.0002448	0.0002727	0.0001367
	14:28 - 15:17	0.0001051	0.0002305	0.0002808	0.0001338	0.001116	0.0001984	0.0002742	0.0001459

*Horas a vermelho contêm erros de aquisição

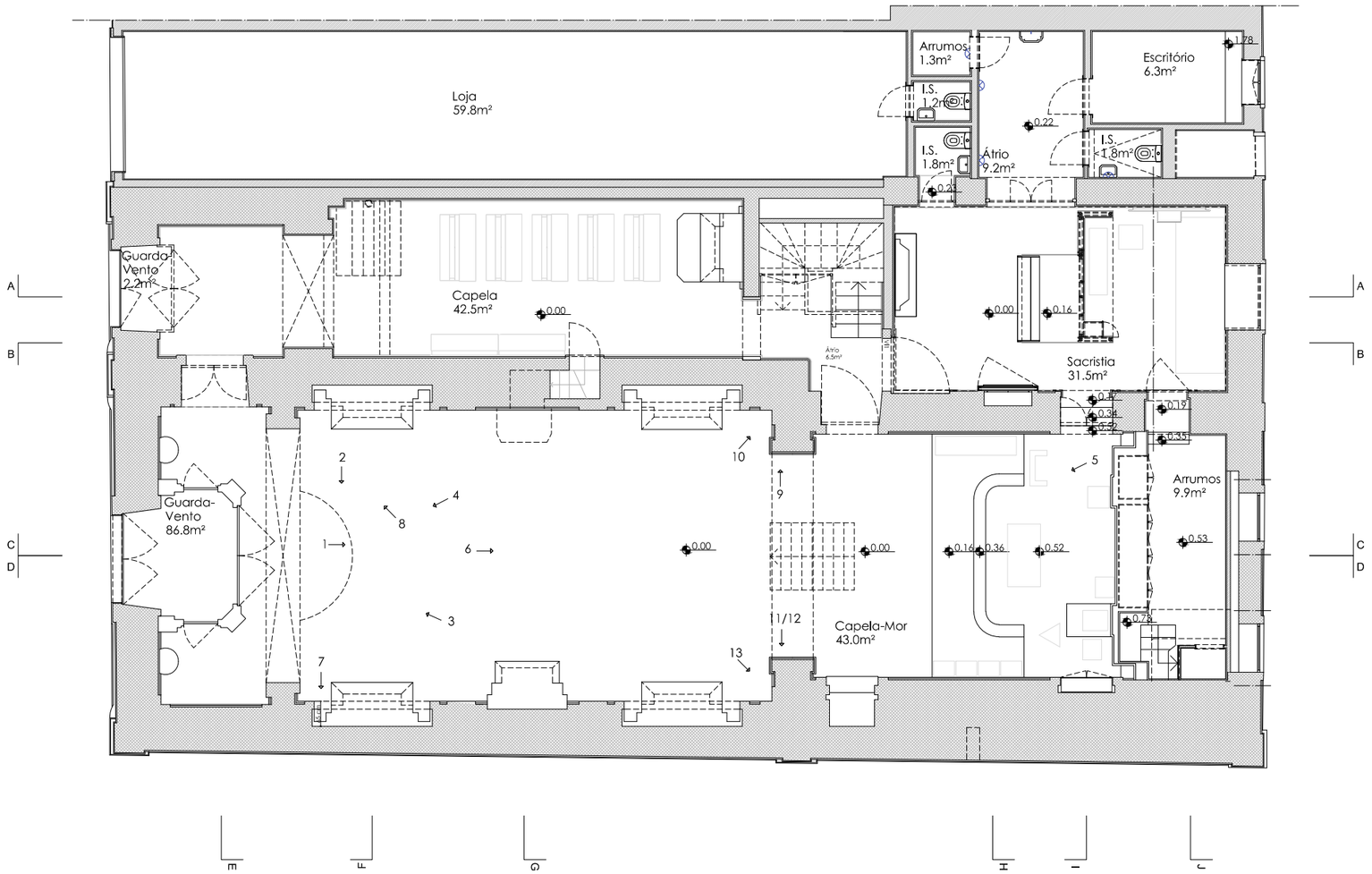
	Horas	Acc_0	Acc_25	Acc_26	Acc_3	Acc_4	Acc_24	Acc_23	Acc_31
Dia 9	15:30 - 16:30	0.0001331	0.0004484	0.0002101	0.000117	0.001316	0.000281	0.005594	9.359E-05
	16:30 - 17:49	0.0001029	0.0002702	0.0002002	0.0001041	0.0004212	0.000195	0.0003923	0.0001892
	17:49 - 19:09	0.0001454	0.0004315	0.0003178	0.0006786	0.0008924	0.0002672	0.0004311	0.0004189
	19:09 - 20:18	0.0002181	0.0002911	0.0001949	0.0000385	0.002007	0.0001995	0.0002287	0.0001815
	20:18 - 21:27	0.000297	0.00008404	0.0002127	0.00002554	0.0006119	0.000055	0.0001294	6.209E-05
	21:27 - 22:34	0.0001447	0.00005457	0.0002019	0.00004195	0.001084	0.00008202	0.0001117	9.299E-05
	22:34 - 23:42	0.00008589	0.00005034	0.000203	0.00002426	0.0004186	0.00008677	0.0000374	9.606E-05
		Acc_0	Acc_25	Acc_26	Acc_3	Acc_4	Acc_24	Acc_23	Acc_31
Dia 10	15:09 - 16:48	0.0001256	0.0005234	0.0002119	0.0001067	0.001994	0.0001713	0.0002254	0.0001661
	16:48 - 17:57	0.0001128	0.001346	0.0002001	0.0001093	0.000919	0.000176	0.0002628	0.0001302
	17:57 - 19:05	0.0001559	0.0007519	0.0002068	0.0001293	0.00111	0.000192	0.000213	0.0001115
	19:05 - 20:15	0.00009996	0.0001697	0.0002056	0.0001213	0.003472	0.000177	0.0003532	0.0002116
	20:15 - 21:23	0.0001196	0.00008977	0.0002091	0.0002008	0.0009773	0.0001186	0.0001667	0.0001201
	21:23 - 22:29	0.0001893	0.0001001	0.0002102	0.00002837	0.000414	0.0001506	0.00008232	0.0001884
	22:29 - 23:37	0.0000911	0.00005966	0.0002137	0.00003303	0.00014	0.00007953	0.00006047	7.957E-05

	Horas	Acc_0	Acc_25	Acc_26	Acc_3	Acc_4	Acc_24	Acc_23	Acc_31
Dia 10	23:42 - 00:50	0.00009613	0.0003346	0.0002109	0.00002299	0.0004508	0.00004719	0.0003401	0.0001308
	00:50 - 01:58	0.0001164	0.00002817	0.0001966	0.00002146	0.0002448	0.00004712	0.00005485	0.0000889
	01:58 - 03:06	0.0001531	0.00004234	0.0002159	0.00002276	0.0003382	0.00005275	0.00009214	0.0001244
	03:06 - 04:13	0.00009367	0.00003281	0.0002146	0.00002319	0.0003963	0.0000625	0.00005721	0.00007802
	04:13 - 05:20	0.0001167	0.00003358	0.0002031	0.00002284	0.0002079	0.00004366	0.00004319	0.00007282
	05:20 - 06:27	0.00007913	0.00003828	0.0002083	0.00002429	0.0007251	0.00003378	0.00005017	0.00008327
	06:27 - 07:35	0.0001082	0.00006151	0.0002199	0.00007875	0.0003846	0.00005022	0.001248	0.0001607
		Acc_0	Acc_25	Acc_26	Acc_3	Acc_4	Acc_24	Acc_23	Acc_31
Dia 11	23:37 - 00:59	0.0001882	0.00009693	0.0002094	0.00002861	0.0002442	0.0001745	0.0001038	0.000169
	00:59 - 02:05	0.0006767	0.0004126	0.0002109	0.00002245	0.0005293	0.0005075	0.0001646	0.0001812
	02:05 - 03:12	0.0001733	0.00005907	0.000201	0.00003191	0.001267	0.00005191	0.00007535	0.0001804
	03:12 - 04:17	0.00009223	0.00004369	0.0002052	0.00002239	0.0004141	0.00004161	0.00004258	0.0001238
	04:17 - 05:23	0.0001411	0.0000375	0.0002003	0.00002485	0.0003715	0.00005104	0.00006915	0.000165
	05:23 - 06:29	0.0001432	0.00005097	0.0002258	0.00002605	0.0006395	0.00005855	0.00007765	0.0001379
	06:29 - 07:36	0.00006171	0.00002348	0.0002013	0.00002325	0.0003286	0.00004016	0.0001486	0.00006766

	Horas	Acc_0	Acc_25	Acc_26	Acc_3	Acc_4	Acc_24	Acc_23	Acc_31
Dia 10	07:35 - 08:44	0.0001258	0.0005414	0.0002378	0.0001361	0.001287	0.0001901	0.002153	0.0002127
	08:44 - 09:54	0.0001764	0.00014	0.0001997	9.309E-05	0.000917	0.0001726	0.0005535	0.000157
	09:54 - 11:03	0.0001136	0.0000926	0.0002192	0.0001079	0.000487	0.0002307	0.001111	0.0002117
	11:03 - 13:22	0.0002039	0.001549	0.0002117	0.0001182	0.006964	0.0002237	0.000583	0.0002427
	13:22 - 14:31	0.0001199	0.0001521	0.0002112	0.0001058	0.000972	0.0005714	0.0002752	0.0001007
	14:31 - 15:09	0.0001225	0.0001198	0.0002062	0.0001106	0.000991	0.0001633	0.000258	0.0001804
		Acc_0	Acc_25	Acc_26	Acc_3	Acc_4	Acc_24	Acc_23	Acc_31
Dia 11	07:36 - 08:44	0.0001398	0.00003351	0.0002074	7.406E-05	0.000661	0.00005733	0.00008874	0.0001558
	08:44 - 09:53	0.000124	0.0003568	0.0002087	0.0001174	0.00074	0.0001296	0.001463	0.0002286
	09:53 - 11:01	0.00009567	0.0002376	0.0001954	8.757E-05	0.000838	0.0001538	0.0003258	0.0002288
	11:01 - 12:10	0.0002426	0.0004691	0.000219	0.0001122	0.000674	0.0002511	0.0007728	0.0004314
	12:10 - 13:19	0.0001366	0.0001088	0.0002018	0.0001176	0.001643	0.0001987	0.000663	0.000418
	13:19 - 14:28	0.0001103	0.000636	0.000215	0.0001128	0.00062	0.0002127	0.0003372	0.0001242
	13:19 - 15:17	0.0001388	0.0002443	0.0001938	0.000121	0.000903	0.0002266	0.000317	0.0001231

E

PEÇAS DESENHADAS DO LEVANTAMENTO DE DANOS DA CAPELA DAS ALMAS



1



2



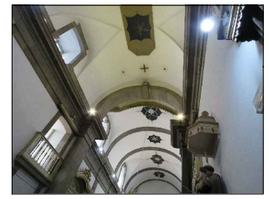
3



4



5



6





13



12



11



10



9



8



7

LEGENDA:

- Pedra
- Alvenaria de tijolo
- Soalho de madeira
- Pavimento cerâmico

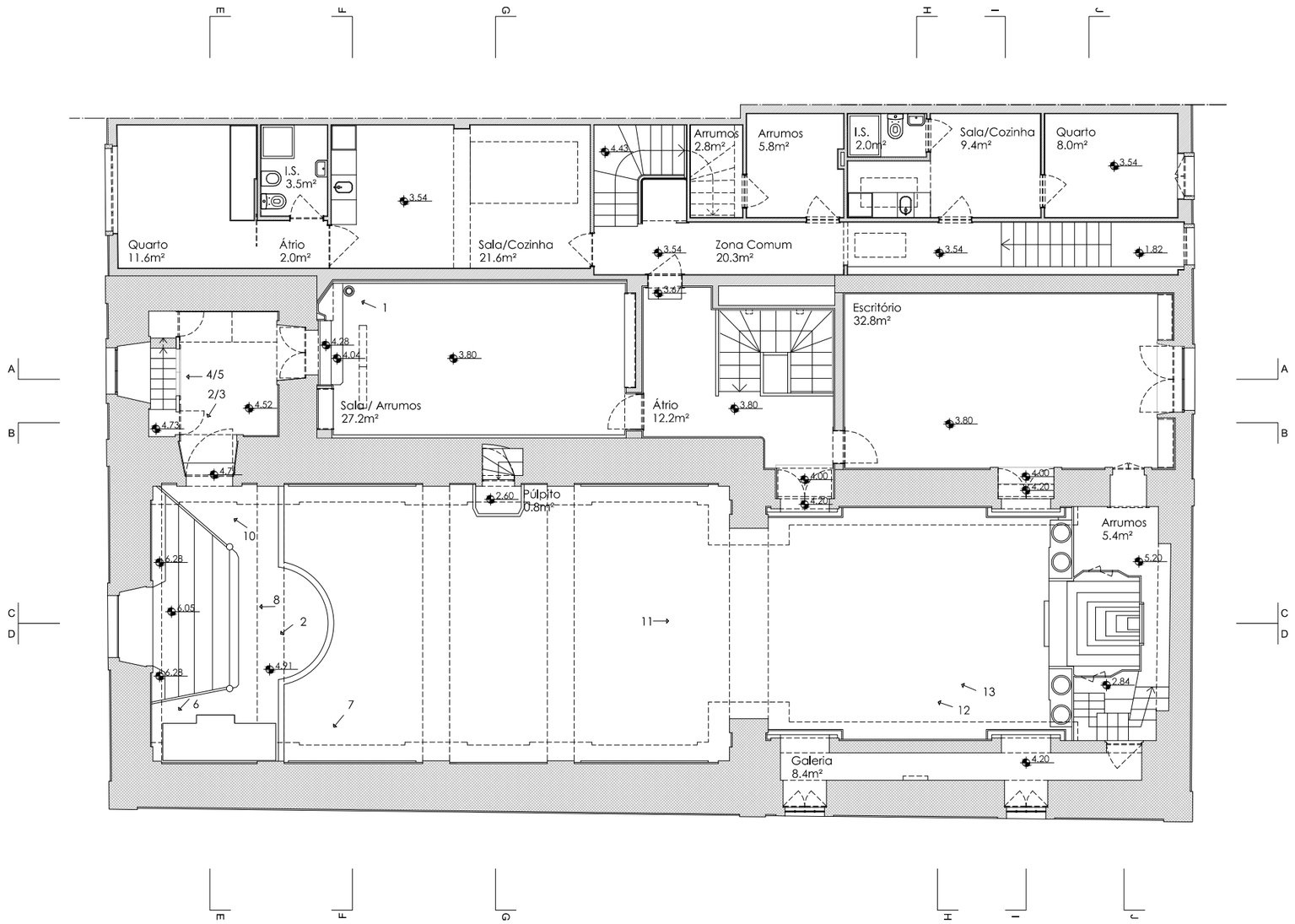
COORDENAÇÃO
ARQ.PEDRO LEÃO

COLABORAÇÃO
CARLOS TRANCOSO
SÓNIA PINA
JOANA ROXO

VENERÁVEL IRMANDADE DAS ALMAS E CHAGAS DE S. FRANCISCO
CAPELA DAS ALMAS - RUA DE STA CATARINA 428, PORTO
LEVANTAMENTO ARQUITECTÓNICO
PLANTA DO PISO TÉRREO
ESCALA 1/80 | JULHO DE 2018

173
REV_00
LEV_03

SONA. ESTUDOS E PROJECTOS. LIMITADA - AVENIDA RODRIGUES DE FREITAS. 197. 4000-421 PORTO - TEL. 22 2084176 - GERAL@SONA.PT



1



2



3



4



5



6



13



12



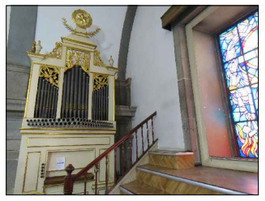
11



10



9



8



7



N

LEGENDA:

- Pedra
- Alvenaria de tijolo
- Soalho de madeira
- Pavimento cerâmico

COORDENAÇÃO
ARQ.PEDRO LEÃO

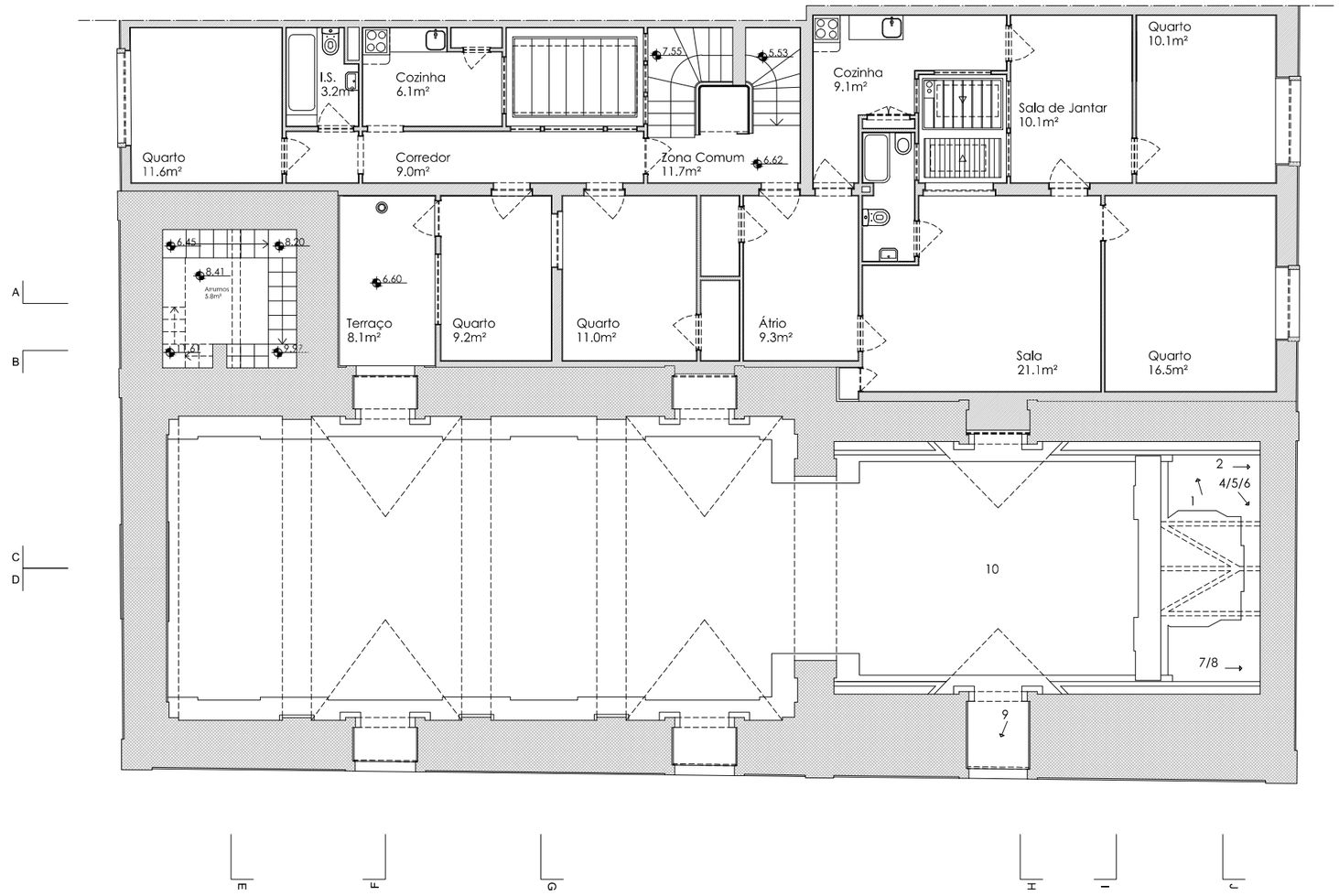
COLABORAÇÃO
CARLOS TRANCOSO
SÓNIA PINA
JOANA ROXO

VENERÁVEL IRMANDADE DAS ALMAS E CHAGAS DE S. FRANCISCO
CAPELA DAS ALMAS - RUA DE STA CATARINA 428, PORTO
LEVANTAMENTO ARQUITECTÓNICO
PLANTA DO PISO 1
ESCALA 1/80 | JULHO DE 2018

173
REV_00
LEV_04

SONA. ESTUDOS E PROJECTOS. LIMITADA - AVENIDA RODRIGUES DE FREITAS. 197. 4000-421 PORTO - TEL. 22 2084176 - GERAL@SONA.PT

SONA



1



2



3



4



5





10



9



8



7



6



LEGENDA:

- Pedra
- Alvenaria de tijolo
- Soalho de madeira
- Pavimento cerâmico

COORDENAÇÃO
ARQ.PEDRO LEÃO

COLABORAÇÃO
CARLOS TRANCOSO
SÓNIA PINA
JOANA ROXO

VENERÁVEL IRMANDADE DAS ALMAS E CHAGAS DE S. FRANCISCO

CAPELA DAS ALMAS - RUA DE STA CATARINA 428, PORTO

LEVANTAMENTO ARQUITECTÓNICO

PLANTA DO PISO 2 E 3

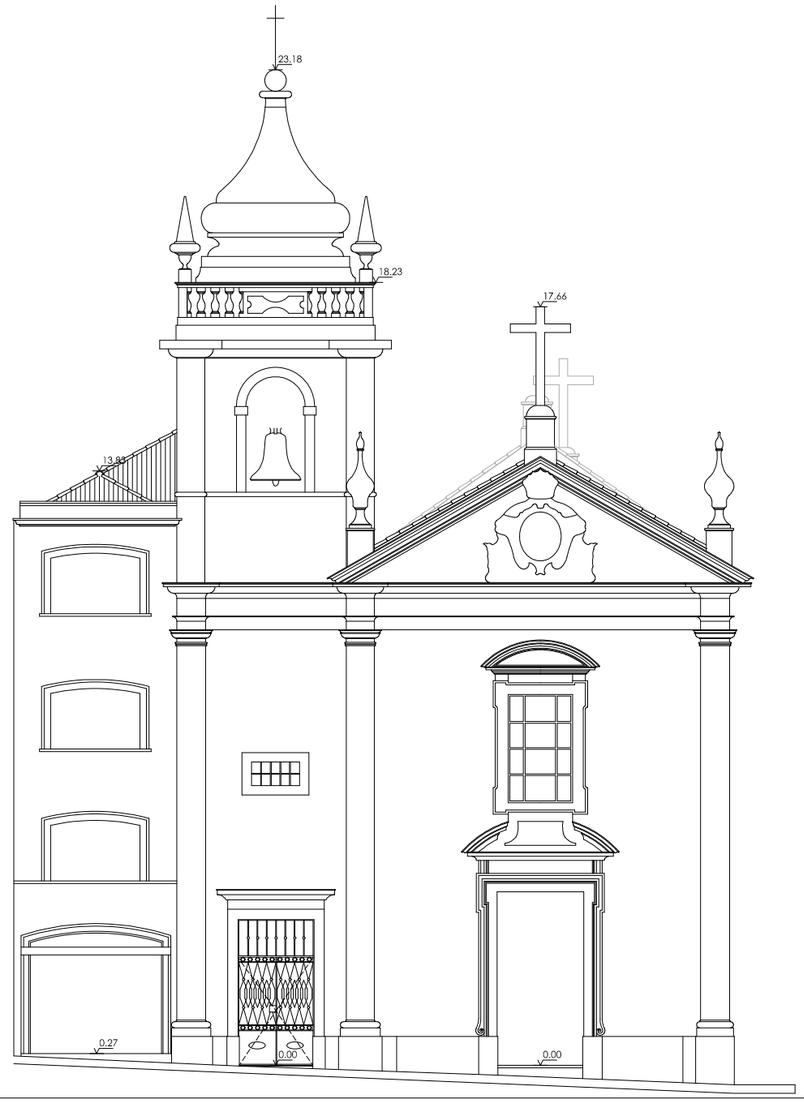
ESCALA 1/80 | JULHO DE 2018

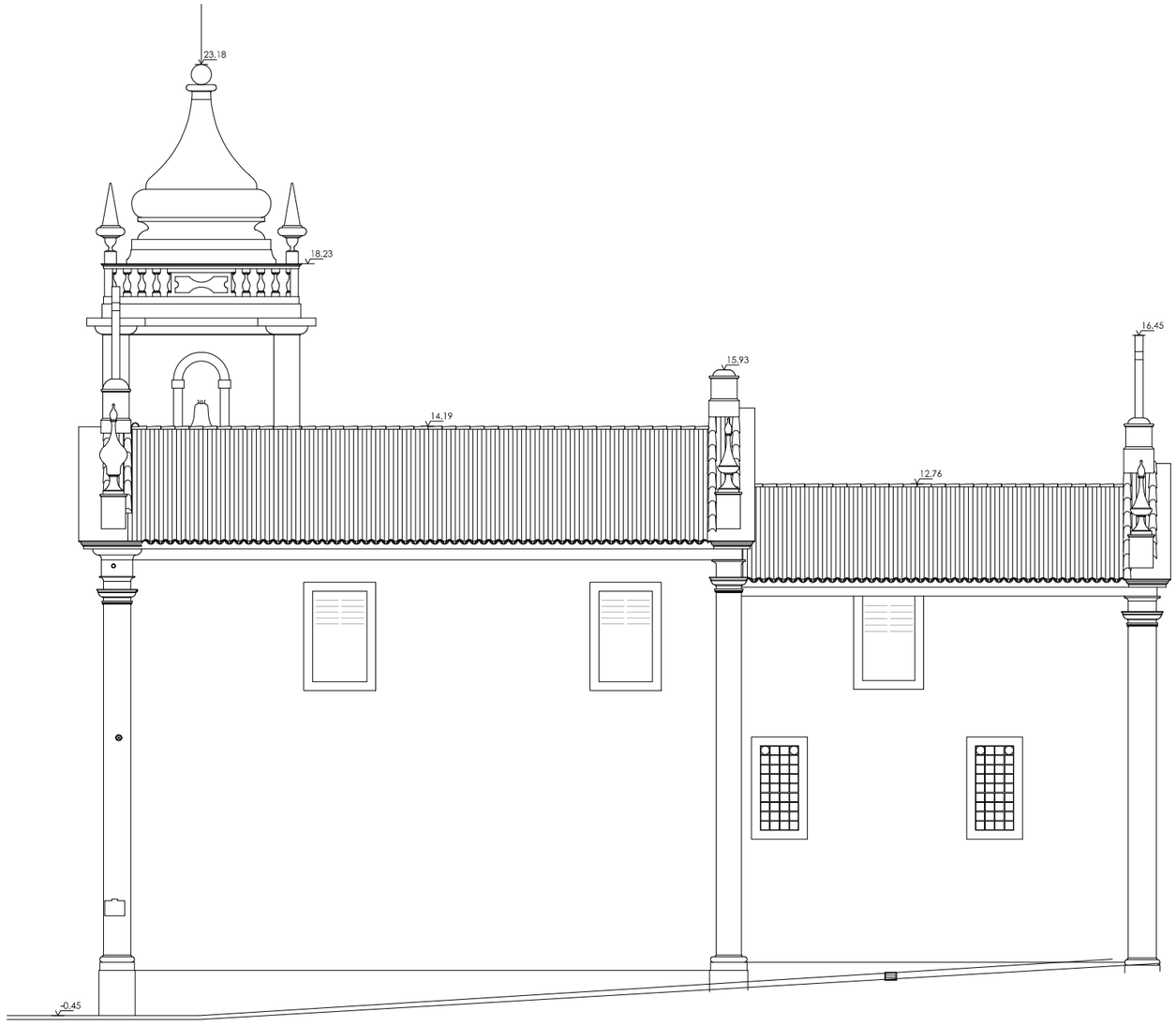
173

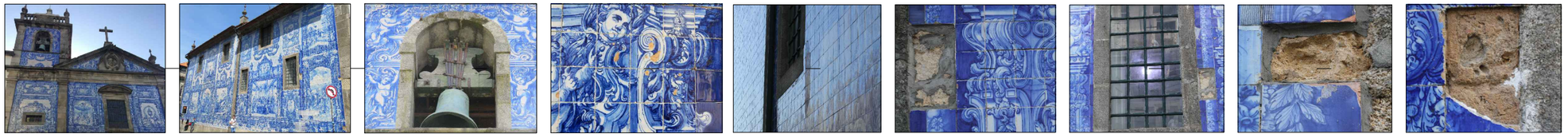
REV_00

LEV_05

SONA. ESTUDOS E PROJECTOS. LIMITADA - AVENIDA RODRIGUES DE FREITAS. 197. 4000-421 PORTO - TEL. 22 2084176 - GERAL@SONA.PT







LEGENDA:

- Pedra
- Alvenaria de tijolo
- Soalho de madeira
- Pavimento cerâmico

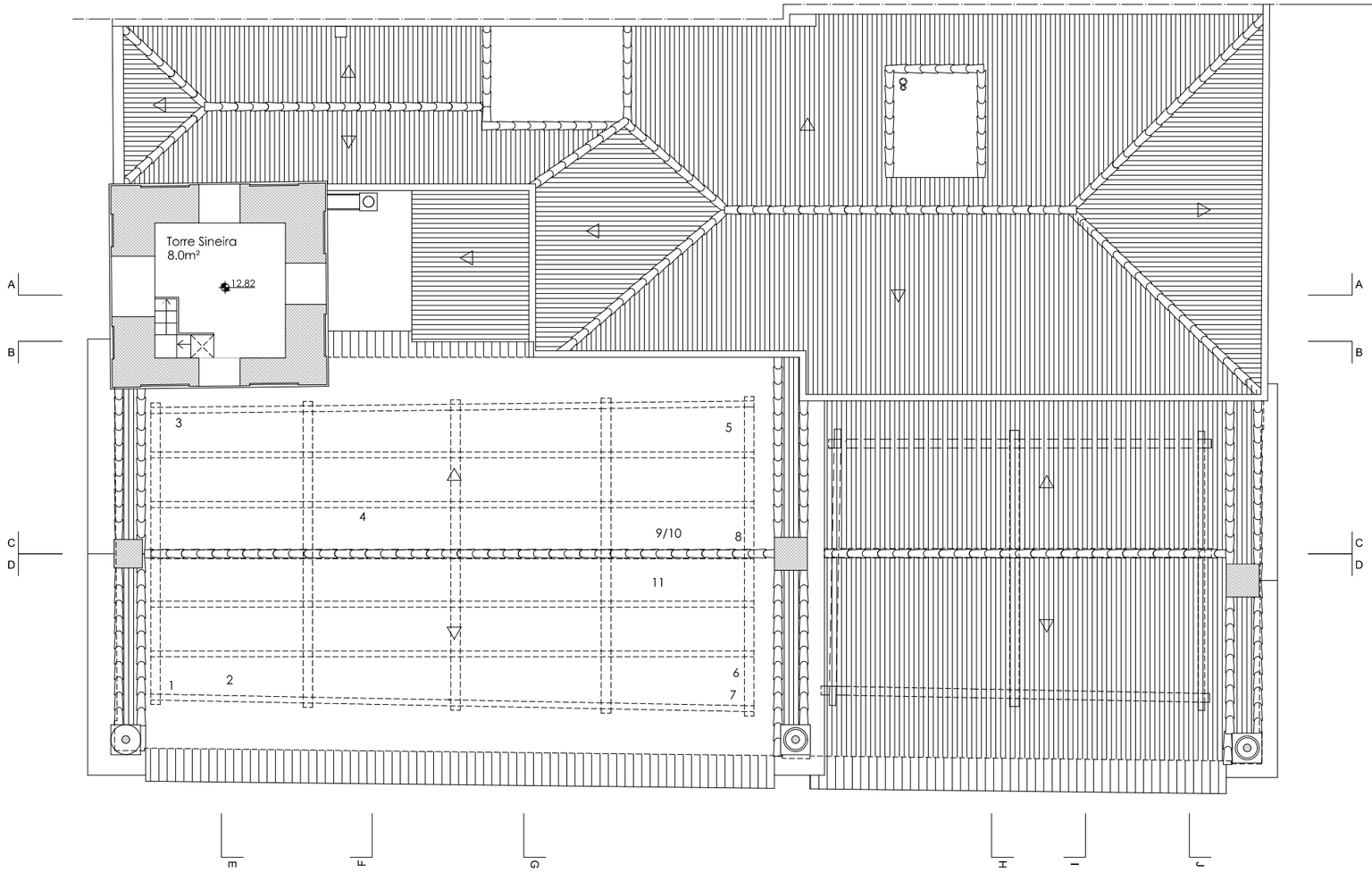
COORDENAÇÃO
ARQ.PEDRO LEÃO

COLABORAÇÃO
CARLOS TRANCOSO
SÓNIA PINA
JOANA ROXO

VENERÁVEL IRMANDADE DAS ALMAS E CHAGAS DE S. FRANCISCO
CAPELA DAS ALMAS - RUA DE STA CATARINA 428, PORTO
LEVANTAMENTO ARQUITECTÓNICO
PLANTA DO PISO 3
ESCALA 1/70 | JANEIRO DE 2018

173
REV_00
LEV_06

SONA. ESTUDOS E PROJECTOS. LIMITADA - AVENIDA RODRIGUES DE FREITAS. 197. 4000-421 PORTO - TEL. 22 2084176 - GERAL@SONA.PT




1


2


3


4


5


11


10


9


8


7


6

N

LEGENDA:

- Pedra
- Alvenaria de tijolo
- Soalho de madeira
- Pavimento cerâmico

COORDENAÇÃO
ARQ.PEDRO LEÃO

COLABORAÇÃO
CARLOS TRANCOSO
SÓNIA PINA
JOANA ROXO

VENERÁVEL IRMANDADE DAS ALMAS E CHAGAS DE S. FRANCISCO

CAPELA DAS ALMAS - RUA DE STA CATARINA 428, PORTO

LEVANTAMENTO ARQUITECTÓNICO

PLANTA DE COBERTURA

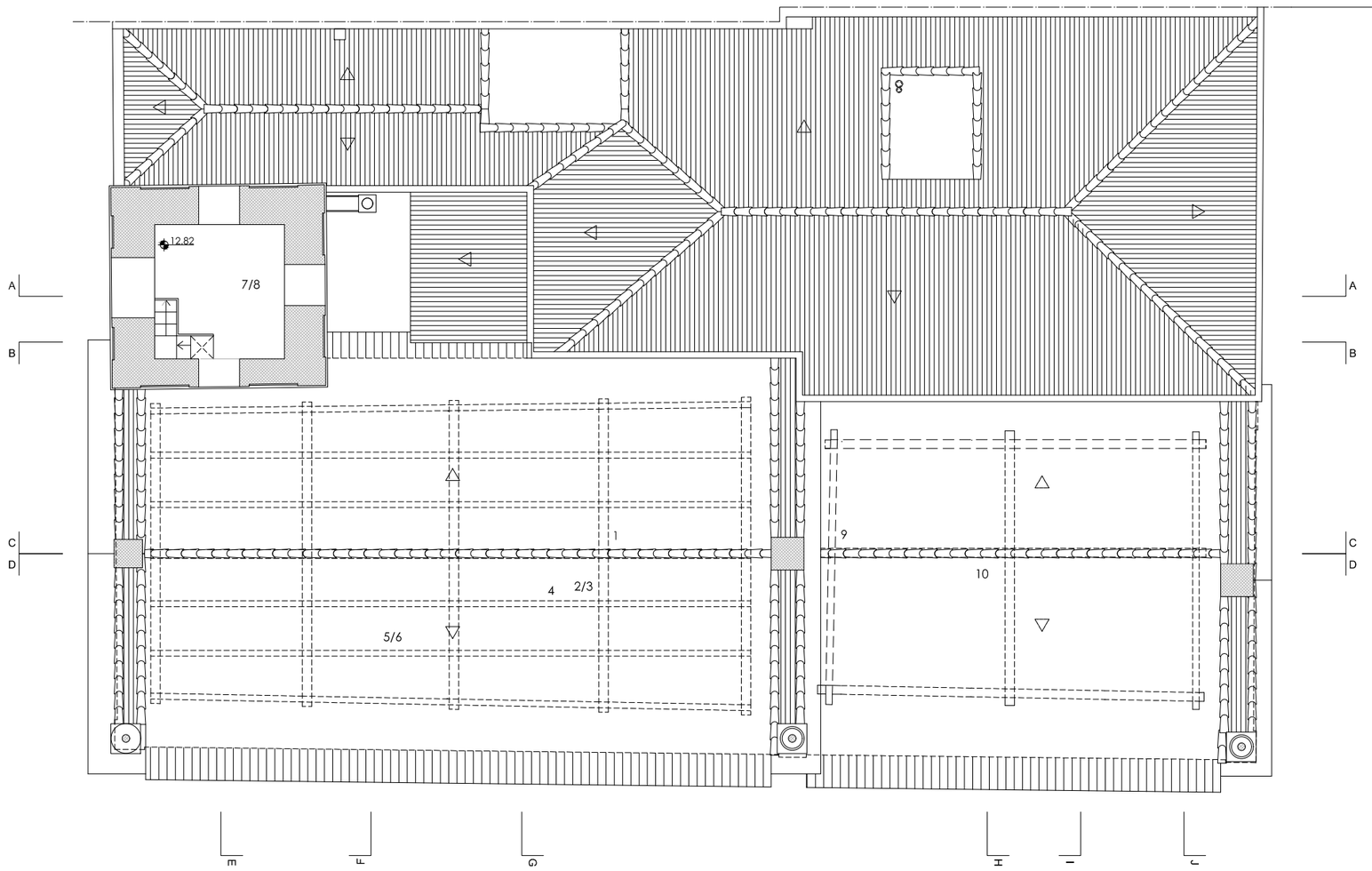
ESCALA 1/80 | JANEIRO DE 2018

173

REV_00

LEV_08

SONA. ESTUDOS E PROJECTOS. LIMITADA - AVENIDA RODRIGUES DE FREITAS. 197. 4000-421 PORTO - TEL. 22 2084176 - GERAL@SONA.PT




1


2


3


4


5


10


9


8


7


6



LEGENDA:

- Pedra
- Alvenaria de tijolo
- Soalho de madeira
- Pavimento cerâmico

COORDENAÇÃO
ARQ.PEDRO LEÃO

COLABORAÇÃO
CARLOS TRANCOSO
SÓNIA PINA
JOANA ROXO

VENERÁVEL IRMANDADE DAS ALMAS E CHAGAS DE S. FRANCISCO
CAPELA DAS ALMAS - RUA DE STA CATARINA 428, PORTO
LEVANTAMENTO ARQUITECTÓNICO
PLANTA DA TORRE SINEIRA
ESCALA 1/80 | JUNHO DE 2018

173
REV_00
LEV_07

SONA. ESTUDOS E PROJECTOS. LIMITADA - AVENIDA RODRIGUES DE FREITAS. 197. 4000-421 PORTO - TEL. 22 2084176 - GERAL@SONA.PT

sona