



Dissertação

Mestrado em Construções Civas

***Avaliação do Comportamento Estrutural da Capela
do Fundador - Mosteiro da Batalha***

Joana Alexandra Borges Bento

Leiria, *Março* de 2017



Dissertação

Mestrado em Construções Civas

***Avaliação do Comportamento Estrutural da Capela
do Fundador - Mosteiro da Batalha***

Joana Alexandra Borges Bento

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Hugo Rodrigues, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Luís Prola, Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

Leiria, *Março* de 2017

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Aos meus Pais

“Somos do tamanho dos nossos sonhos.”

(Fernando Pessoa)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Depois de terminada mais uma etapa importante do meu percurso académico e da minha vida, não poderia deixar de demonstrar reconhecimento e agradecimento a todos os que contribuíram com o seu apoio durante esta longa caminhada, e de alguma forma permitiram a realização deste trabalho. Sem eles, nunca teria sido possível. Assim sendo agradeço desta forma:

Aos meus pais que sempre me proporcionaram condições para me formar e exercer a minha profissão.

Ao professor Hugo Rodrigues, uma excelente pessoa e um profissional ímpar, pela paciência, disponibilidade e orientação prestada que sempre manifestou.

Ao Engenheiro e amigo João Baptista, pelo apoio e disponibilidade sempre que foi necessário.

Ao IPL (Instituto Politécnico de Leiria), ESTG (Escola Superior de Tecnologia e Gestão) de Leiria por colocar ao dispor equipamentos e meios que foram essenciais à realização deste trabalho.

À direção e colaboradores do Mosteiro da Batalha, que abriram sempre que necessário as portas e forneceram, todos os dados, documentos e facilitaram o acesso ao todo e qualquer local do monumento necessário para este trabalho. Em particular ao Dr. Joaquim Ruivo, que como diretor do Mosteiro se disponibilizou para ajudar em tudo o que foi necessário e ao Dr. Pedro Redol, pelo seu vasto conhecimento e disponibilidade de préstimos de informação à cerca do Mosteiro.

Ao departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro pela disponibilização de equipamento de aquisição de dados, acelerómetros e sismógrafos.

Ao LESE – Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela disponibilização de sismógrafos.

Por fim e completando a lista de agradecimentos, a todos os amigos, colegas e docentes que me acompanharam ao longo do percurso académico e que me deixaram um pouco do seu conhecimento.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

A presente dissertação pretende analisar o comportamento estrutural da Capela do Fundador. Esta é uma das capelas integrantes do Mosteiro da Batalha e também uma das mais isoladas da estrutura. Posto isto, pretende-se fazer uma breve avaliação do seu estado de conservação e seguidamente comparar um modelo numérico com resultados obtidos através de ensaios não destrutivos à estrutura.

Numa primeira fase é feita uma abordagem ao estado de conservação dos monumentos em Portugal, que servirá de introdução para uma descrição da Capela do Fundador. Essa descrição permitirá obter informação de todas as suas características, estado de conservação, ensaios anteriormente efetuados e os resultados obtidos nas análises anteriores já executadas.

Seguidamente será feita uma análise dinâmica que irá caracterizar o atual estado de conservação da estrutura onde serão usados os dados obtidos através de ensaios dinâmicos. Por fim será elaborado um modelo numérico que servirá para fazer a comparação dos valores obtidos experimentalmente.

Por fim será feita uma breve análise do comportamento da estrutura quando sujeita à ação sísmica e qual a intensidade sísmica que provocará danos irreversíveis na estrutura.

Palavras-chave: Capela do Fundador; ensaios não destrutivos; análise dinâmica; comportamento estrutural

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

The present dissertation intends to analyze the structural behavior of the Capela do Fundador. The Capela do Fundador is one of the chapels that are part of the Mosteiro da Batalha and also one of the most isolated of the structure. After this, we intend to make a brief evaluation of its conservation status and then compare a numerical model with results obtained through non-destructive tests. An approach is taken to the state of preservation of monuments in Portugal, which will serve as an introduction to a description of the Capela do Fundador. This description will allow to obtain information of all its characteristics, state of conservation, tests previously carried out and the results obtained in the previous analyzes already executed. A dynamic analysis will also be performed, which includes the current state of conservation of the structure through the analysis of results obtained through dynamic tests, and elaboration of a numerical model that will serve to make a comparison of the values obtained experimentally. Finally, it is presented a brief analysis of the behavior of the structure when subjected to the seismic action and the seismic intensity that will cause irreversible damages to the structure.

Keywords: *Capela do Fundador; non-destructive tests, dynamic analysis, structural behaviour*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 – Planta do Mosteiro da Batalha (Silva & Redol, 2007).....	30
Figura 2 – Gráfico de Quantificação do Módulo de Elasticidade (Branco & Azevedo, 1990)	33
Figura 3 – Mapeamento das patologias no Alçado Este (Vazão, 2015).....	38
Figura 4 – Mapeamento das patologias no Alçado Sul (Vazão, 2015)	39
Figura 5 – Mapeamento das patologias no Alçado Oeste (Vazão, 2015).....	40
Figura 6 – Mapeamento das patologias na Cobertura (Vazão, 2015)	41
Figura 7 - Preparação de Detonação de Explosivos (Lopes, et al., 2010)	48
Figura 8 – Efeito de <i>aliasing</i> : a) Sinal de amostragem adequado; b) Sinal de amostragem deficiente (Fernandes, 2014)	54
Figura 9– Funcionamento de um filtro (Caetano, Identificação Experimental de Parâmetros Dinâmicos em Sistemas Estruturais, 1992).	56
Figura 10 – Efeito de <i>aliasing</i> : a) Frequência de amostragem adequada e b) Frequência de amostragem deficiente (Pimentel, 2008).....	57
Figura 11 – Acelerómetro piezoelétrico: a) Esquema de constituição genérico (Fernandes, 2014); b) Exemplo.....	59
Figura 12 – Modos de funcionamento dos acelerómetros piezoelétricos: a) Funcionamento em flexão;	59
Figura 13 - Macro-sismógrafo da marca Nanometrics, modelo TitanSMA (Nanometrics, 2016).....	62
Figura 14 - Fotografia de Vigé & Plessix (1849 a 1873) (Vazão, 2015)	64
Figura 15 – Capela do Fundador (Vazão, 2015)	64
Figura 16 – Alçado Sul do Mosteiro da Batalha – Capela do Fundador (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)	66
Figura 17 – Alçado Este do Mosteiro da Batalha – Capela do Fundador (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)	66

Figura 18 – Alçado Oeste do Mosteiro da Batalha – Capela do Fundador (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)	67
Figura 19 – Acelerómetros piezométricos e representação dos dados adquiridos	68
Figura 20 – Alçado Oeste do Mosteiro da Batalha – Capela do Fundador (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)	68
Figura 21 – Representação dos Setups considerados na medição das acelerações	69
Figura 22 – Planta da Capela do Fundador com o esquema de Setups considerados	70
Figura 23 – Resultados experimentais das Frequências e Modos de Vibração.....	71
Figura 24 – Espectro de Fourier	72
Figura 25 - Sismógrafo de movimento forte, modelo TitanSMA da marca Nanometrics®	73
Figura 26 – Montagem do sistema de aquisição de dados para o ensaio dinâmico de vibração ambiental	73
Figura 27 – Representação esquemática do <i>Setup</i> 1, considerado para a medição de acelerações usando o sismógrafo	74
Figura 28 - Representação esquemática do <i>Setup</i> 2, considerado para a medição de acelerações usando o sismógrafo	74
Figura 29 – Janela de análise do programa SeismoSignal	75
Figura 30 - Transformada de Fourier do registo das acelerações para os pontos de medição a) 3 na direção transversal; b) 5 na direção transversal; c) 9 na direção transversal; d) 9 na direção longitudinal.	76
Figura 31 – Representação da malha do Modelo Numérico (Autodesk Robot Structural Analysis).....	79
Figura 32 – Planta de Tetos (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha).....	79
Figura 33 – Corte Transversal (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha).....	79
Figura 34 – Sobreposição Espectro Sismo Tipo 1 e Tipo 2.....	82
Figura 35 – Primeiro modo de vibração (Autodesk Robot Structural Analysis)	84
Figura 36 – Segundo modo de vibração (Autodesk Robot Structural Analysis)	84
Figura 37 – Terceiro modo de vibração (Autodesk Robot Structural Analysis).....	85

Figura 38 – Primeiro modo de vibração – Estrutura s/ apoios laterais (Autodesk Robot Structural Analysis)	87
Figura 39 – Segundo modo de vibração – Estrutura s/ apoios laterais (Autodesk Robot Structural Analysis)	87
Figura 40 – Terceiro modo de vibração – Estrutura s/ apoios laterais (Autodesk Robot Structural Analysis)	88
Figura 41 – Tensões máximas de compressão (Autodesk Robot Structural Analysis)	90
Figura 42 – Escala das tensões máximas de compressão	90
Figura 43 – Tensões máximas de tração (Autodesk Robot Structural Analysis)	91
Figura 44 – Tensões máximas de tração (Autodesk Robot Structural Analysis)	91
Figura 45 – Exemplo de Fissuração nas zonas de maior tensão (Vazão, 2015)	92
Figura 46 – Escala de Tensões	96

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas dos Materiais (Branco & Azevedo, 1990).	32
Tabela 2 – Valores Esclerométricos (Branco & Azevedo, 1990).....	33
Tabela 3 – Frequências e Modos de Vibração.....	72
Tabela 4 – Propriedades do material adotado para o modelo numérico.....	81
Tabela 5 – Propriedades do material adotado para o modelo numérico.....	83
Tabela 6 – Resultados das frequências experimentais vs frequências numéricas	83
Tabela 7 – Comparação de Frequências para cada Modo de Vibração.....	85
Tabela 8 – Tabela de Modos de Vibração com Variação do Módulo de Elasticidade.....	89
Tabela 9 – Tensões de Tração para a ação sísmica (Autodesk Robot Structural Analysis)	93

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	X
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XVII
ÍNDICE	XX
1. INTRODUÇÃO	23
1.1. Considerações Gerais	23
1.2. Estado de Conservação dos Monumentos em Portugal	24
1.3. Objetivos	25
1.4. Organização da Dissertação	25
2. CASO DE ESTUDO	27
2.1. Mosteiro da Batalha	27
2.2. Análise Preliminar da Construção	28
2.3. Capela do Fundador	31
2.3.1. Caracterização geométrica	31
2.3.2. Caracterização Mecânica dos Materiais	32
2.3.3. Degradação dos Materiais	33
2.3.4. Problemas Resultantes da Intervenção Humana	34
2.3.5. Problemas Resultantes de Ações Naturais Extremas	35
2.3.6. Trabalhos Anteriores	36
2.3.7. Comentários finais	42

3.	ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA	43
3.1.	Introdução	43
3.1.1.	Excitação Forçada	44
3.1.2.	Excitação Ambiental	44
3.2.	Ensaio Dinâmico Não Destrutivo	45
3.3.	Identificação Dinâmica In Situ	46
3.3.1.	Noções Gerais	46
3.3.2.	Excitação Forçada	47
3.3.3.	Vibração Ambiental	48
3.4.	Aquisição e Processamento de Sinal	49
3.4.1.	Frequência de Amostragem e Tempo de Aquisição	50
3.4.2.	Erros	51
3.4.2.1.	Ruído Analógico	51
3.4.2.2.	Tendências	52
3.4.2.3.	Perdas de Sinal	53
3.4.2.4.	Saturação de Sinal	53
3.4.2.5.	Erros de Escorregamento - Leakage	53
3.4.2.6.	Erros por Sobreposição - Aliasing	54
3.4.3.	Processamento de Sinal	55
3.4.3.1.	Aplicação de Filtros Digitais	55
3.4.3.2.	Decimação	57
3.5.	Sistemas Clássicos de Medição	58
3.5.1.	Transdutores de Aceleração	58
3.5.1.1.	Acelerómetros Piezoelétricos	58
3.6.	Sismógrafos	61
3.6.1.	Noções Gerais	61
3.6.2.	Macro-sismógrafos	61
4.	ENSAIO DE CARATERIZAÇÃO DINÂMICA NA CAPELA DO FUNDADOR	63
4.1.	Introdução	63
4.2.	Determinação de Frequências e Modos de Vibração através de Acelerómetros	66

4.2.1.	Caraterização Geométrica da Estrutura	66
4.2.2.	Sistema de Aquisição de Dados	67
4.2.3.	Setup de ensaio	68
4.2.4.	Resultados do ensaio	70
4.3.	Determinação de Frequências Próprias com Sismógrafos	73
4.3.1.	Introdução	73
4.3.2.	Sistema de Aquisição de Dados	73
4.3.3.	Setup de ensaio	74
4.3.4.	Resultados	75
5.	ANÁLISE ESTRUTURAL	77
5.1.	Descrição do Modelo Numérico	78
5.2.	Propriedades dos Materiais	80
5.3.	Ações Estáticas e dinâmicas	81
5.4.	Calibração do Modelo Numérico	82
5.5.	Estudos Paramétricos	85
5.6.	Verificação de Segurança	89
5.6.1.	Análise das Ações Gravíticas	89
5.6.2.	Ação Sísmica	92
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	97
6.1.	Principais Conclusões	97
6.2.	Trabalhos Futuros	98
	BIBLIOGRAFIA	99

1. Introdução

1.1. Considerações Gerais

A alvenaria de pedra é um dos sistemas construtivos mais utilizado e que mais caracteriza o nosso país. Inicialmente surgiu como uma primeira forma de inserção de elementos estruturais pré-fabricados. As pedras naturais eram recolhidas em locais próprios e daí transportadas para o local onde se ia edificar a estrutura, onde posteriormente eram montadas. Este material, sendo natural, tinha defeitos difíceis de minimizar, como por exemplo a sua degradação pelos agentes ambientais. Geralmente as pedras usadas na construção eram obtidas nas pedreiras mais próximas, mas, no caso de monumentos, podiam vir de pedreiras mais distantes, onde o material de melhor qualidade estivesse disponível.

A maioria dos monumentos mais imponentes e importantes da História, são constituídos por alvenaria de pedra, que ao longo dos anos se foi degradando e, por conseguinte, se foi recuperando através de vários tipos de intervenções.

Os monumentos, bem como as construções tradicionais, fazem parte da história das civilizações e além disso, foi através deste património que se pôde perceber as diversas técnicas construtivas utilizadas, bem como os materiais disponíveis na altura, os meios de construção existentes e o desenvolvimento dos mecanismos que permitiram a sua edificação. Muitas das técnicas construtivas usadas nos monumentos ainda hoje são utilizadas, uma vez que essas mesmas técnicas constituem a base de toda a construção.

Nas últimas décadas, tem-se verificado um aumento no interesse em conservar e reabilitar o património construído. Património este, constituído por palácios, castelos, igrejas, mosteiros, mas também por edifícios habitacionais e comerciais que fazem parte das zonas históricas das cidades. Por conseguinte, têm sido desenvolvidas técnicas que melhor conservem a construção já existente e que ao mesmo tempo não prejudiquem ou alterem as suas características iniciais.

1.2. Estado de Conservação dos Monumentos em Portugal

O património contruído com o decorrer dos anos sofre as consequências das ações ambientais e dos diferentes usos sociais a que são sujeitos. O “restauro” destes monumentos tem como objetivo recuperar o seu bom estado e tentar ao máximo recuperar as suas qualidades originais. Porém tal tarefa não é simples, uma vez que ao longo dos tempos foram sendo desenvolvidos novos materiais, técnicas de construção e correntes artísticas e arquitetónicas. Por causa disso, muitas das técnicas anteriormente utilizadas foram também sendo descartadas ao longo dos anos pois foi-se constatando que a sua aplicação não era a mais correta ou que certos tipos de materiais seriam incompatíveis, tendo consequências destrutivas ao invés de conservativas.

Em Portugal existe um vasto conjunto de manifestações construtivas de carácter histórico, influenciadas pelos múltiplos contactos que os portugueses tiveram com outros povos e culturas.

Como já foi referido anteriormente, existe a necessidade de conservar o património histórico existente, porém existem muitos fatores que condicionam essa reabilitação. São necessários técnicos especializados, análises detalhadas do estado de conservação, conhecimento dos materiais disponíveis e respetivo comportamento após aplicação e os custos que essa reabilitação acarreta. A viabilidade económica é fundamental para o “sucesso” deste tipo de intervenções. Uma vez que os trabalhos de recuperação são operações de elevada complexidade e que requerem técnicos especializados, têm custos mais elevados quando comparados com uma construção nova. Embora se note alguma diferença em relação ao passado, existem poucas empresas especializadas que asseguram de forma satisfatória os trabalhos de conservação e restauro, apesar de a legislação que regula esta atividade não se equiparar à de outros países, uma vez que é demasiado permissiva.

Os trabalhos de análise, inspeção, diagnóstico e projeto exigem equipas multidisciplinares, sendo necessário dar uma nova oportunidade ao património abandonado, com especial enfoque nos centros históricos e no património rural, que se encontram abandonados em diversas áreas do País (Luso, 2004).

O património histórico é extremamente importante não só para atrair visitantes ao país, mas também para evidenciar as raízes de um povo e a sua cultura. É através desse

património que as gerações mais novas podem ter conhecimento da sua origem e respeitar a sua cultura. Além disso é importante manter os monumentos e centros históricos com as devidas condições de acessibilidade e habitabilidade. No caso dos monumentos, o seu estado de conservação irá permitir manter a sua morfologia e a suprimir a constante degradação a que são sujeitos (condições climáticas).

1.3. Objetivos

Com a presente dissertação pretende-se a aquisição de conhecimento da constituição da estrutura do monumento, bem como obter informações acerca do seu comportamento estrutural, nomeadamente do comportamento estrutural da Capela do Fundador em relação à restante estrutura e saber quais as possíveis consequências da envolvente exterior a este. Assim sendo os objetivos são:

- i) Avaliação visual do estado de conservação do mosteiro, mais pormenorizadamente da Capela do Fundador;
- ii) Avaliação do comportamento estrutural da Capela do Fundador;
- iii) Construção de um modelo de cálculo representativo;
- iv) Avaliação dos efeitos das ações gravíticas e ação sísmica sobre a estrutura

1.4. Organização da Dissertação

Esta dissertação foi dividida em seis capítulos. No primeiro Capítulo é possível encontrar uma breve introdução ao tema do estado de conservação dos monumentos em Portugal, bem como aos objetivos pretendidos com a dissertação.

Seguidamente no Segundo Capítulo será descrito o caso em estudo, ou seja, encontrar-se-á uma descrição mais focada na Capela do Fundador, bem como tudo o que com esta se relaciona, incluindo anteriores trabalhos que foram feitos nesta subestrutura do monumento.

O Terceiro Capítulo irá corresponder à descrição e revisão dos métodos de ensaios dinâmicos e a tudo o que este envolve. Ou seja, serão referidos os tipos de ensaios dinâmicos existentes, quais os objetivos dos mesmos e quando são utilizados.

O Quarto Capítulo corresponderá à descrição dos ensaios realizados efetuados na Capela do Fundador e análise dos resultados obtidos e que nos permitiram calibrar o modelo numérico desenvolvido no Capítulo 5.

O Quinto Capítulo refere-se à descrição do modelo numérico de elementos finitos desenvolvido, assim como das análises estáticas lineares, considerando as ações gravíticas e a ação sísmica.

Por fim no Sexto, e último Capítulo são referidas as principais conclusões obtidas com o presente trabalho, assim como são discutidos alguns dos possíveis desenvolvimentos futuros.

2. Caso de Estudo

2.1. Mosteiro da Batalha

Os monumentos mais grandiosos demoravam anos e por vezes séculos para serem construídos, passando por várias fases de construção e várias alterações de projeto conforme os gostos e os ideais dos arquitetónicos da época e das orientações reais.

O Mosteiro da Batalha foi mandado construir como agradecimento pela vitória da Batalha de Aljubarrota. Esta batalha consagrou a plena independência do reino português.

No caso do Mosteiro da Batalha, a construção mais monumental e representativa da arte gótica em Portugal, foi mandado construir por D. João I (1385-1433) ao estilo gótico e os trabalhos prolongaram-se até ao reinado de D. João III (1521-1557), onde já se construía no estilo Manuelino. Embora não haja certezas sobre a data exata de início das obras de construção do Mosteiro da Batalha, é um fato que a formação do grande estaleiro, ter-se-á iniciado um ou dois anos após a batalha de Aljubarrota, como consta no testamento do monarca.

Num curto espaço de tempo o mosteiro sofreu várias calamidades, nomeadamente o terramoto de 1755. No terramoto de 1755, o Mosteiro foi afetado por fendas nas abóbadas e muros, e conseqüentes infiltrações de água. “Em 1810 os invasores franceses roubaram, partiram e incendiaram, em 1811 um incêndio causou vastos danos, entre eles a destruição do claustro mandado fazer por D. João III e em 1834 a extinção das ordens religiosas determinou o abandono”. Salvaram-no, em 1840, os cuidados do Rei consorte D. Fernando II e do Engenheiro Mouzinho de Albuquerque. Foram efetuadas algumas obras posteriormente, sem a necessária fidelidade aos originais, mas, certo é, evitaram a perda total. Os vitrais ainda subsistentes e outras intervenções de restauro foram efetuadas pela Direção Geral de Monumentos e Edifícios Nacionais, já recentemente (Luso, 2004).

Durante a primeira década de obras de restauro (1840-1850), foi a igreja que foi alvo do maior volume de trabalhos, embora também se tenham operado noutras dependências do mosteiro, sobretudo na consolidação dos telhados, para evitar infiltrações pluviosas (Silva & Redol, 2007).

2.2. Análise Preliminar da Construção

O mosteiro da Batalha é constituído por várias áreas distintas, característica comum aos monumentos construídos nesta época. O Mosteiro é composto pela Igreja, Capela do Fundador, Claustro Real, Casa do Capítulo, Dormitório ou adega dos Frades e o Refeitório, Claustro Afonsino e Capelas Imperfeitas.

A igreja do Mosteiro da Batalha, tem proporções quase inéditas na arquitetura medieval portuguesa, com cerca de 80 metros de comprimento, por 22 de largura e 32.5 de altura. A estrutura da igreja foi delineada pelo mestre Afonso Domingues e estrutura-se segundo uma cruz latina, com o braço mais longo constituído por três naves de oito desenvolvidos tratos, sendo a do centro mais elevada e larga que as duas laterais. O braço menor, designado transepto, é bem saliente a nível volumétrico, uma vez que se ergue à mesma altura da nave central. A cabeceia estrutura-se em cinco capelas poligonais dispostas perpendicularmente aos braços do referido transepto, sendo a do meio - capela-mor - mais elevada e profunda que as restantes quatro, todas iguais entre si. A nível exterior, a igreja é uma das imagens mais expressivas do edifício, produzida pelo segundo arquiteto, mestre Huguet. Distingue-se pelo arredondado das platibandas que rematam os muros até aos elementos vegetalistas, que se colam nos pináculos piramidais; do arco contracurvado que desenha o portal e o janelão da fachada principal até às formas movimentadas que constituem as bandeiras das janelas de grande formato existentes nas paredes de todo o monumento e na Capela do Fundador (Silva & Redol, 2007).

O Claustro Real tem dimensões parecidas às da igreja (50x50 metros) e encosta-se ao lado norte do Mosteiro. A sua arquitetura é composta por abóbadas, perfis de ogivas e secções de nervuras, bases de colunas, capiteis e escultura. São distintos os arquitetos responsáveis pela sua construção: a galeria sul, encostada à igreja e a galeria de nascente, para onde abre a casa do capítulo, são da responsabilidade do primeiro arquiteto, Afonso Domingues; a galeria norte, para onde abre o dormitório primitivo e a galera poente, que dá acesso ao refeitório, são da responsabilidade do segundo arquiteto, Huguet (Silva & Redol, 2007).

A casa do Capítulo surge a meio da galeria nascente do claustro, logo após a sacristia, sendo uma divisão quadrangular com cerca de 19 metros de lado. Esta é a dependência claustral com funções de maior relevo na vivência diária dos Monges (Silva & Redol, 2007).

O Dormitório ou Adega dos Frades ocupa quase toda a extensão da quadra do claustro virada a norte. É uma sala muito vasta, coberta por uma abóbada de berço quebrado, ritmada por poderosos arcos torais. A iluminação desta divisória é feita através de vãos retangulares colocados a um nível elevado e de uma grande janela de dois lumes aberta na parede de nascente. A última dependência integrante do claustro real é o refeitório, colocado ao longo da quadra poente. Precede-o o lavabo, uma pequena galeria quadrangular, com uma fonte ao centro, disposta nos ângulos das correspondentes galerias (Silva & Redol, 2007).

O Claustro Afonsino, encontra-se encostado ao claustro real pelo lado norte, e tem cerca de 44x44 metros de dimensões e apresenta a mesma planta quadrada e os mesmos sete tratos por cada lado. A sua construção é atribuída a Fernão de Évora, responsável pelas obras do Mosteiro da Batalha entre 1448 e 1477 (Silva & Redol, 2007).

As Capelas Imperfeitas ou Panteão de D. Duarte, foram colocadas por detrás da Capela-mor, alinhadas com a igreja e estruturam-se segundo um desenvolvimento octogonal com a entrada a eixo e sete capelas radiantes separadas por pequenos corpos triangulares (Silva & Redol, 2007).

Por fim, a Capela do Fundador, encontra-se encostada à direita da fachada principal da igreja e desenvolvendo-se ao longo de três tramos. Esta capela tem uma planta quadrangular que pelo exterior contribui para uma ampliação da dimensão horizontal, aumentando a grandiosidade do conjunto monástico (Silva & Redol, 2007). Sobre a planimetria quadrangular implanta-se um corpo oitavado de dois registos coroado por uma abóbada estrelada. Ao centro alberga o túmulo de D. João I e de D. Filipa de Lencastre. Os restantes muros da capela são ocupados por outros monarcas. Segundo a descrição de Frei Luís de Sousa, o octógono da capela era coroado por uma esguia agulha piramidal, destruída pelo terramoto de 1755. O arquiteto James Murphy serviu-se desta descrição para elaborar a gravura da capela. Ainda, segundo James Murphy, depois do sismo, D. José I mandou proceder a obras na capela, porém não se sabe o que foi mandado fazer na capela por ordem deste rei, e a pirâmide que se erguia sobre o octógono não foi reconstruída. Depois do desastre natural de 1755, a capela sofreu nova onda de destruição, desta vez provocada pelas invasões francesas, onde foram violados os templos e danificados os altares (Silva & Redol, 2007).

Após visita ao Mosteiro da Batalha, pode verificar-se que a Capela do Fundador se encontra mais isolada do resto do monumento. Por causa da sua localização faz com que seja possível uma modelação o mais aproximada possível do real, daí a sua escolha.

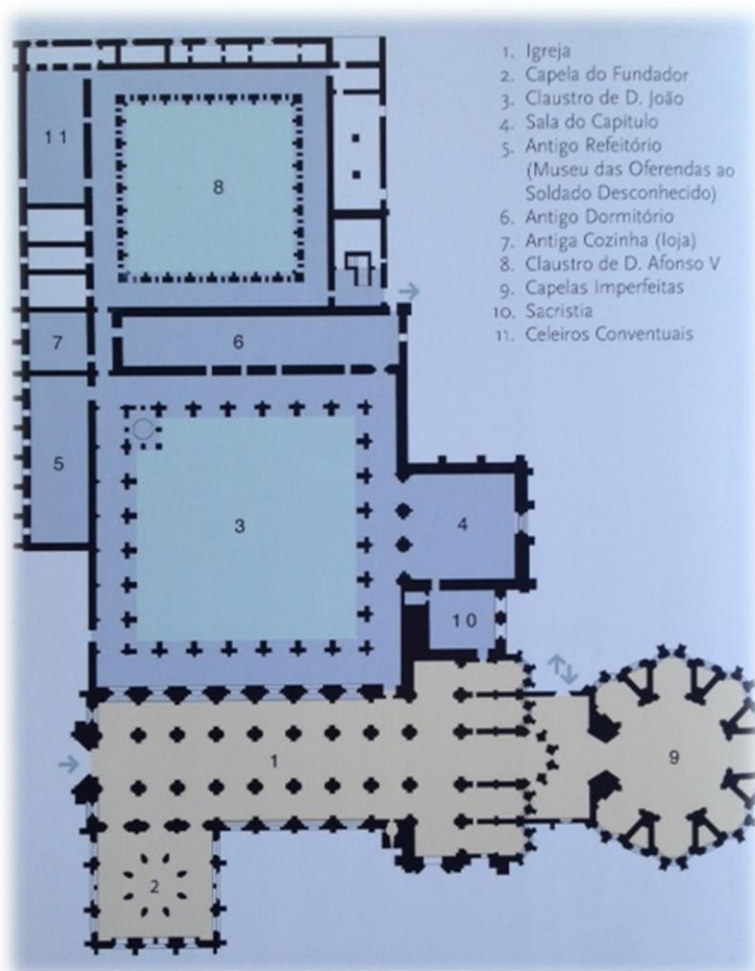


Figura 1 – Planta do Mosteiro da Batalha (Silva & Redol, 2007)

O objetivo da Dissertação é a análise estrutural da Capela do Fundador do Mosteiro da Batalha. São apresentados os ensaios de caracterização dinâmica realizados para apoiar o desenvolvimento de um modelo numérico que permita analisar o comportamento estrutural desta construção.

Depois da observação da estrutura é possível verificar que o monumento se encontra relativamente em boas condições, requerendo, no entanto, uma manutenção contínua, que não é feita com regularidade, como se verificou na parte dos terraços. Note-se

que também devido à sua grande dimensão existem locais de difícil acesso, ou mesmo inacessíveis.

2.3. Capela do Fundador

2.3.1. Caracterização geométrica

Como já referido na análise preliminar da construção, a Capela do Fundador situa-se à direita da fachada principal da igreja. Tem uma conotação fúnebre, pois é onde se localiza a maior parte dos túmulos existentes no Mosteiro. É uma estrutura quadrangular e desenvolve-se ao longo de três tramos. Esta estrutura quadrangular transforma-se ao centro num octógono, definido no piso térreo por oito pilares heterogéneos que se abrem em arcos quebrados ornamentados. O segundo andar do octógono cobre-se com uma complexa abóbada estrelada, onde se encontram esculpidas as armas de D. João I. Por baixo dessa abóbada e no centro da capela, encontram-se os túmulos de D. João I e Dona Filipa de Lencastre. A abóbada cria assim um efeito de cobertura para o túmulo dos dois esposos. Nos restantes lados da capela encontram-se os jazigos, ocupados por filhos e netos de reis. Por cima destes jazigos, situam-se umas amplas janelas, compostas por vitrais que conferem uma grande luminosidade à capela. Também no piso superior, todos os lados do octógono possuem uma grande abertura em arco, constituída por vitrais coloridos.

Esta capela possui apenas por uma abertura em forma de arco que dá acesso à parte interior da igreja, não tendo qualquer abertura direta com o exterior. É composta por quatro pilares estruturais principais que formam os cantos da estrutura numa geometria assimétrica, sendo que dois deles fazem ligação direta com a restante estrutura do mosteiro. Depois, a dividir os tramos de parede, existem mais dois pilares, que se desenvolvem para o interior e exterior da estrutura, conferindo um certo contraventamento à capela. Entre os pilares situam-se as janelas, também elas em forma de arco, constituídas por vitrais. A janela central de cada tramo é maior do que as das extremidades. Na parte exterior da capela é visível uma extensão dos pilares em formato de arco ao centro, dando uma ideia de suporte ao octógono formado no piso superior. Na parte superior do octógono, existe uma abóbada, onde se pensa já ter existido um pináculo piramidal, conforme os desenhos encontrados nos arquivos do mosteiro.

2.3.2. Caracterização Mecânica dos Materiais

No mosteiro observa-se a aplicação de um calcário inicial, mais escuro, que foi posteriormente e de modo relativamente localizado, substituído por um calcário, de cor mais clara, provavelmente proveniente de outra pedreira.

Com vista a uma futura análise da segurança dos elementos estruturais do mosteiro, foi ensaiado um provete do calcário inicial utilizado no mosteiro, o que conduziu às seguintes propriedades mecânicas (Branco & Azevedo, 1990).

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas dos Materiais (Branco & Azevedo, 1990).

Módulo de Elasticidade	$E = 7.000.000 \text{ kN/m}^2$
Resistência à compressão	$f_c = 37\ 000 \text{ kN/m}^2$
Peso específico	$\Pi = 22,94 \text{ kN/m}^3$

Com estes parâmetros será possível desenvolver modelos numéricos da estrutura, conhecida a sua geometria, e avaliar os níveis de tensão existentes ou que se desenvolverão, por exemplo sob ações sísmicas.

O valor do módulo de elasticidade encontrado é relativamente baixo para um calcário, o que demonstra a fragilidade do material. Isto é ainda confirmado pela existência de elementos conquíferos no material ensaiado.

A resistência à compressão foi também estimada com recurso a ensaios não-destrutivos, nomeadamente o ensaio de dureza superficial (Esclerómetro de Schmidt) nos dois tipos de pedra calcária existentes no mosteiro para comparar as respetivas resistências relativas, tendo-se obtido os seguintes valores para o número do esclerómetro:

Tabela 2 – Valores Esclerométricos (Branco & Azevedo, 1990)

Calcário novo	34	32	34	40	38	40	38	40
Calcário Antigo	38	46	38	46	44	44	44	36

Estes resultados indicam que o calcário designado de mais recente tem de facto uma menor resistência mecânica que o calcário inicialmente utilizado no Mosteiro.

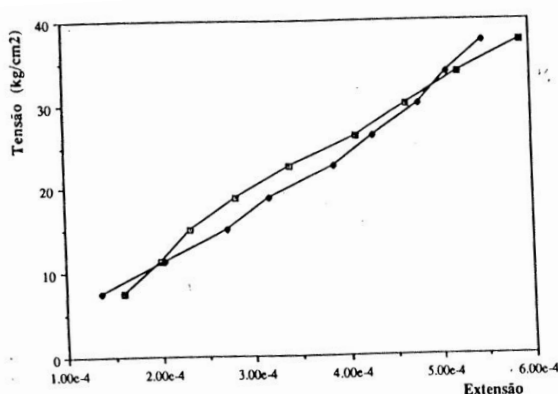


Figura 2 – Gráfico de Quantificação do Módulo de Elasticidade (Branco & Azevedo, 1990)

Foram feitos ensaios com esclerómetro durante o ano de 2015, onde o valor estimado para o módulo de elasticidade dinâmico foi de 41,6 GPa. Este valor foi convertido para o módulo de elasticidade estático de acordo com Najibi et al (2014) para 22,5 GPa.

2.3.3. Degradação dos Materiais

A degradação dos materiais pode surgir devido ao seu envelhecimento, por ação dos agentes ambientais ou ainda fatores provocados pelo ser humano. As patologias associadas a estas situações não têm em geral, e à primeira vista, um carácter estrutural. No caso do Mosteiro da Batalha estas patologias manifestam-se essencialmente com a deterioração da pedra e degradação do material das juntas de alvenaria e fissuras pontuais de alguns elementos de alvenaria

A patologia mais abrangente na pedra são as crostas negras. Essa camada negra que reveste o Mosteiro deve-se à proliferação da colonização biológica, como líquenes, fungos e micro-organismos. As crostas negras estão presentes nos pináculos, na parte superior dos arcobotantes, flores-de-lis e contrafortes maioritariamente a jusante das gárgulas. A localização desta patologia deve-se sobretudo a zonas de escorrência de água, onde os micro-organismos transportados pela água ficam depositados na pedra (Vazão, 2015).

A deterioração da pedra a nível da cobertura do claustro é visível em diversas zonas, em particular nos elementos expostos ao quadrante Nordeste. Esta deterioração, já originou em diversos elementos, desagregações que chegam a atingir 5-10% da secção afetada. A sua origem, provavelmente está associada a uma ação química conjugada com uma ação erosiva do vento.

As juntas abertas são visíveis principalmente na parte central por cima das janelas do octógono e também em algumas janelas inferiores. Segundo análise do varrimento laser scanning, este facto poderá dever-se a deslocamentos na parte superior do octógono. Para um controlo da espessura destas aberturas, devia implementar-se um sistema de monitorização. Existe, contudo, a cintagem metálica envolvente em redor da Capela do Fundador que ajuda ao confinamento da cobertura (Vazão, 2015).

A degradação do material das juntas, que provoca uma consequente abertura das mesmas, resulta em geral do natural envelhecimento dos materiais, nomeadamente perda de coesão das argamassas. A ação erosiva do vento e das variações térmicas também contribuem para essa degradação. Periodicamente estas juntas deveriam ser refechadas com materiais apropriados.

Se os aspetos anteriormente referidos forem descuidados, existe a possibilidade de queda de alguns elementos de alvenaria que poderão provocar estragos localizados.

2.3.4. Problemas Resultantes da Intervenção Humana

Em resultado da atuação humana direta, existem problemas como consequência das obras realizadas no Claustro D. Afonso V em que a substituição da

cobertura de madeira por outra de laje de vigotas, com o correspondente aumento de peso, provocou fissuração em alguns dos pilares de suporte do beiral e pode continuar a provocar impulsos que excedam a capacidade resistente quer dos pilares quer dos contrafortes dos cunhais do claustro.

A alteração realizada na envolvente do mosteiro também se repercute através dos seguintes aspetos:

- a) A existência da IC2 (antiga EN1) próxima do Mosteiro levou a um estudo dos efeitos das vibrações do tráfego, o que para a situação da altura (1990) se mostrou sem significado. Também os aspetos relacionados com a poluição deveriam ser analisados, bem como seria importante a execução de medições periódicas, uma vez que se suspeita que algum tipo de pedra possa sofrer alterações devido à agressividade ambiental (Branco & Azevedo, 1990).

Segundo o estudo realizado em 1990, ainda não eram conhecidas as condições de fundação. Constatou-se que não havia indícios de conclusivos de assentamentos diferenciais e os assentamentos, em princípio, já se desenvolveram ao longo dos 600 anos de vida da estrutura. Pensou-se que caso a estrutura não estivesse assente diretamente em rocha (o que se podia suspeitar devido ao assentamento localizado observado no piso da igreja), deveria averiguar-se a possibilidade de ocorrerem eventuais variações do nível freático resultantes da atividade da povoação vizinha (Branco & Azevedo, 1990).

2.3.5. Problemas Resultantes de Ações Naturais Extremas

Uma estrutura que sobrevive há mais de 600 anos, é considerada uma estrutura que já sofreu um conjunto significativo de ações naturais, em alguns casos extremas. Dentro destas ações, a ação sísmica é uma das mais importante, e a prova disso está nos danos causados à estrutura pelo sismo de 1755 e de 1969. De fato este tipo de estruturas está essencialmente concebido para suportar cargas verticais, por esse motivo as ações horizontais associadas aos sismos originam frequentemente trações nos elementos de alvenaria, que estes não conseguem suportar.

Tipicamente os elementos estruturais mais vulneráveis são as torres e os pináculos. Ou seja, os elementos estruturais mais esbeltos, de pequena secção transversal e peso reduzido e com um centro de gravidade longe da base. A ação horizontal, ao atuar no centro de gravidade, gera momentos significativos na base que levam frequentemente ao derrube desses elementos estruturais. Assim sendo, são de particular importância os torreões na base dos arcobotantes pois são elementos concebidos para ajudar à estabilidade global dos arcos das naves.

Tendo em conta que o Mosteiro da Batalha suportou um dos eventos sísmicos mais significativos da nossa história, apenas com o colapso de alguns elementos, não são expectáveis danos severos para sismos semelhantes, mas são esperados danos localizados que terão que ser reparados a posteriori, de modo a não colocar em causa o património existente. A alternativa de reforço dos elementos estruturais para obter maior segurança face a um futuro sismo deve ser cuidadosamente encarada, pois isso obriga em geral a criar uma estrutura híbrida com materiais recentes, o que nem sempre tem conduzido a bons resultados. Assim sendo, recomenda-se a curto prazo promover ações de reparação e manutenção para reduzir a velocidade de degradação dos materiais e estrutura, nomeadamente através de: selagem das juntas existentes, com um material que possua alguma capacidade resistente à tração e que não ataque quimicamente a pedra; instalação de um sistema de monitorização na igreja, onde se observem as maiores deformações, para avaliar a sua eventual evolução; fazer um levantamento fotogramétrico de toda a estrutura de forma a permitir uma fácil reconstituição do mosteiro, em caso da ocorrência de danos e também verificar com maior rigor alterações à atual geometria, por eventual evolução de fendas.

2.3.6. Trabalhos Anteriores

Em trabalhos anteriores foi feito um levantamento e caracterização das patologias da Capela do Fundador do Mosteiro da Batalha, bem como monitorizações das vibrações ambientais.

Segundo (Vazão, 2015) são várias as condições que proporcionam a alteração das rochas naturais, tais como a termodinâmica, os agentes químicos do meio ambiente ou até mesmo produtos para a sua conservação. Da alteração do material

pétreo podem surgir patologias como a desagregação, decomposição e coloração como é o caso da pátina.

De acordo com (Costa, 2009)“*A alteração provoca a destruição das redes cristalinas dos minerais e a movimentação dos iões para posições em estruturas mais abertas.*”

O mecanismo de meteorização ou deterioração da rocha acontece aquando da passagem a um novo equilíbrio, depois de estar sujeita a ações de variações de amplitude termodinâmicas (Costa, 2009)

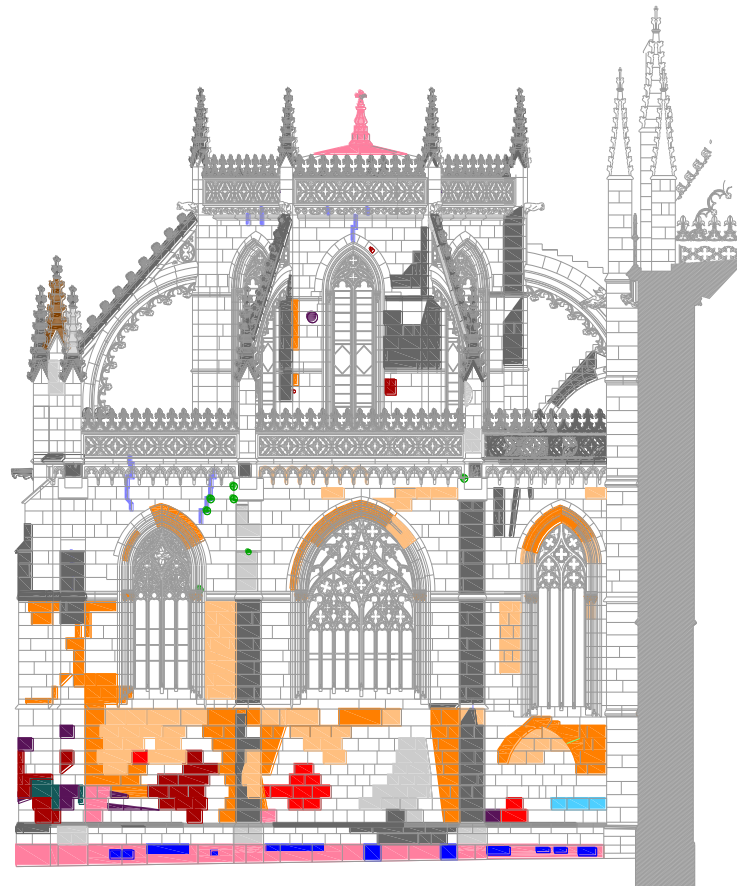
A meteorização desencadeia-se com as seguintes ações físicas:

- Expansão derivada de amplitudes térmicas;
- Expansão consequente do congelamento (aumento de volume) da água na rede porosa da rocha;
- Expansão por descompressão;
- Mecanismos provocados por seres vivos;
- Ações eólicas (vento).

A ação da água e do ar são fontes de alterações químicas tais como:

- Oxidação;
- Redução;
- Dissolução;
- Hidrólise;
- Oxidação-Hidratação.

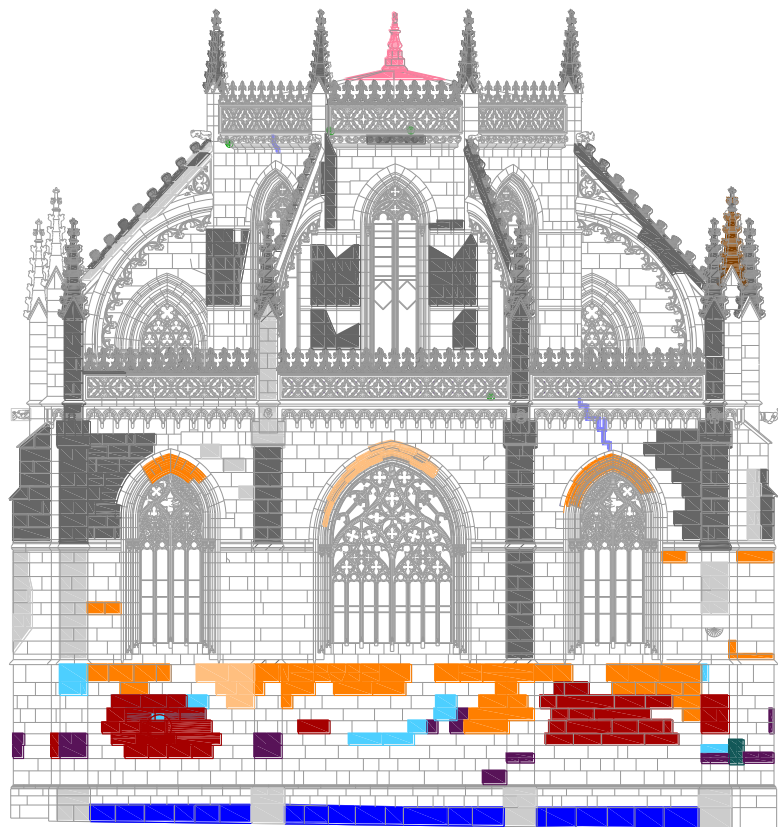
Foi elaborado um mapeamento onde é possível verificar quais as zonas afetadas, e qual o tipo de patologia associada.



Legenda:

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

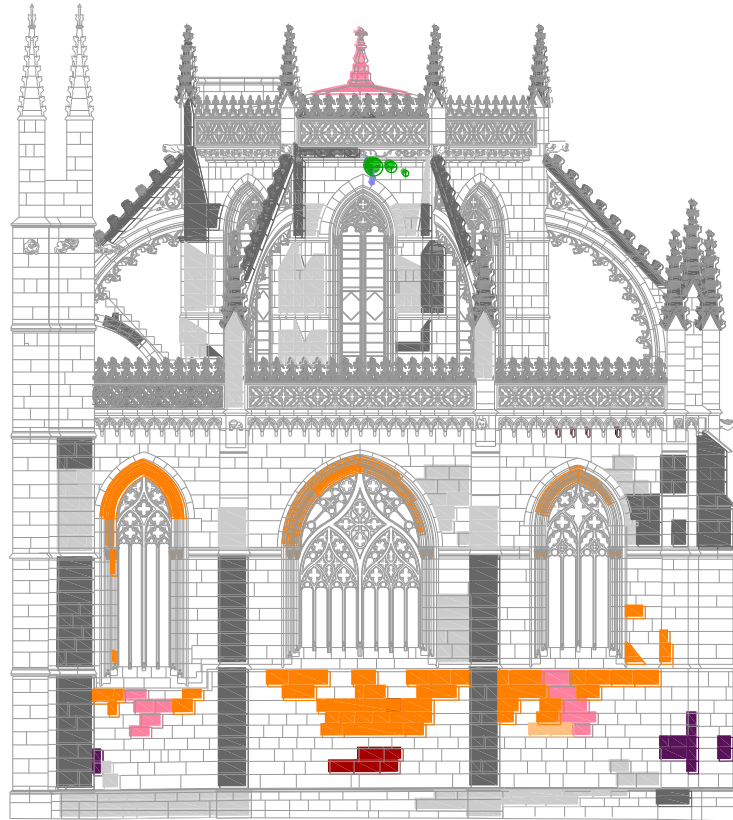
Figura 3 – Mapeamento das patologias no Alçado Este (Vazão, 2015)



Legenda:

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

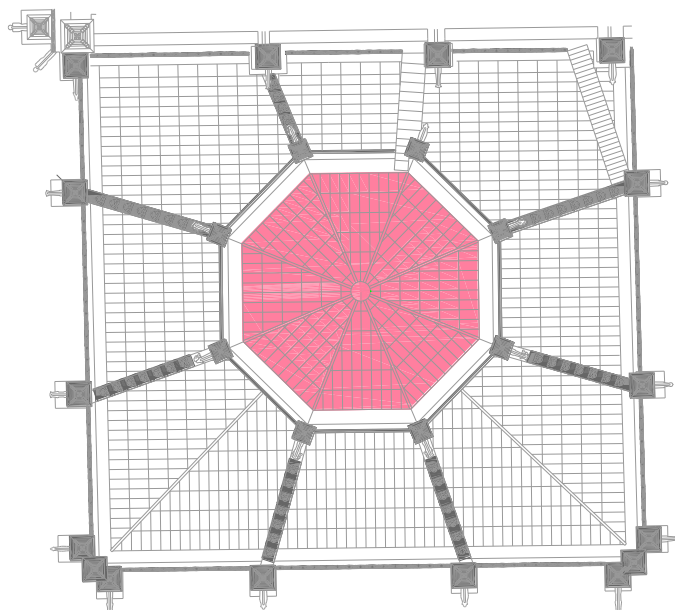
Figura 4 – Mapeamento das patologias no Alçado Sul (Vazão, 2015)



Legenda:

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

Figura 5 – Mapeamento das patologias no Alçado Oeste (Vazão, 2015)



Legenda:

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

Figura 6 – Mapeamento das patologias na Cobertura (Vazão, 2015)

Segundo o trabalho anterior (Pedroso, 2016), foram avaliados os impactos das vibrações provocadas pelo tráfego automóvel que circula no IC2, sobre a estrutura e vitrais do Mosteiro da Batalha e avaliada a integridade estrutural e estética do Mosteiro da Batalha.

O objetivo central desse estudo foi a análise do comportamento das vibrações desde a origem (IC2) até ao Mosteiro da Batalha, e também na estrutura do monumento propriamente dita, avaliando-se a redução das vibrações nos 70 metros entre a o IC2 e a fachada, com um sistema de acelerómetros (Pedroso, 2016).

O estudo da amplificação das vibrações ao longo na estrutura permitiu compreender o comportamento dinâmico do monumento, bem como a otimização de tempo dos equipamentos, definindo as posições de medição. A medição da velocidade das vibrações e comparação com as normas depois do tratamento dos dados auxiliou nessa tarefa (Pedroso, 2016).

Foi também conseguida, com o estudo de (Pedroso, 2016) a caracterização dinâmica dos vitrais do Mosteiro da Batalha e a comparação dos valores de vibração aí encontrados, com os valores que foram verificados nas vibrações da estrutura, com o objetivo específico de analisar a diferença da vibração entre elementos estruturais e elementos não estruturais frágeis e importantes para o monumento.

2.3.7. Comentários finais

Com o decorrer do tempo, os problemas que mais se evidenciam nas estruturas antigas resultam essencialmente devido à degradação por envelhecimento dos materiais e agentes ambientais, problemas resultantes da deficiente intervenção humana e problemas resultantes de ações naturais de grande intensidade para as quais a estrutura não foi dimensionada.

É também possível concluir que nos primeiros estudos efetuados ao Mosteiro, que datam 1990, as vibrações provenientes do IC2 poderiam ser inferiores quando comparadas com as atuais. Além disso, também o estudo feito aos materiais, e apenas sobre um provete de calcário, apresenta diferenças consideráveis relativamente a avaliações mais recentes.

3. Ensaio de Caracterização Dinâmica

3.1. Introdução

Para garantir a segurança de uma estrutura, é indispensável a existência de um conhecimento o mais profundo possível do estado da mesma. Para se obter esse conhecimento, pode ser implantado um programa de inspeção, onde sejam recolhidos dados da estrutura através da observação. Tal procedimento irá permitir a avaliação do estado da mesma.

As ações de inspeção podem ser divididas em: inspeção periódica ou de rotina, e a inspeção detalhada. A inspeção periódica define-se como sendo a inspeção visual e direta de todas as partes visíveis de uma estrutura. Permite o controlo e avaliação de uma forma geral, do estado da estrutura e é comparada com uma tabela de inspeção visual parametrizada com uma escala, facilitando a classificação do estado de conservação (Fernandes, 2014).

A inspeção detalhada surge como consequência da inspeção periódica, ou seja, quando a classificação da inspeção periódica exige um maior detalhe na identificação e caracterização dos problemas detetados durante a inspeção de rotina. Esta tem como objetivo quantificar o efeito referente ao dano detetado na estrutura. Para tal, utilizam-se os ensaios não-destrutivos.

A identificação dinâmica de estruturas constitui uma das técnicas atualmente mais utilizadas com vista à caracterização mecânica *in situ* de estruturas. Todas as estruturas possuem características de rigidez, massa e amortecimento que determinam o seu comportamento face a ações dinâmicas. O seu conhecimento permite determinar as características modais das estruturas, sejam elas as frequências próprias de vibração ou as deformadas modais associadas a cada frequência. De igual forma, e com o auxílio de modelos numéricos, o seu conhecimento permite efetuar a avaliação da resposta das estruturas quando sujeitas a ações conhecidas, de carácter estático ou dinâmico (Lopes, et al., 2010).

Assim, os problemas desta natureza, onde se mobiliza o comportamento dinâmico das estruturas, podem resumir-se de uma forma simplista a relações excitação-resposta. Face a estas relações, podem existir três tipos de problemas: o problema direto,

que consiste em caracterizar a resposta, conhecendo as propriedades da excitação e as características do sistema; o problema inverso, que consiste em caracterizar a excitação, conhecendo as características do sistema e da resposta; o problema da identificação de sistemas, que consiste em caracterizar as propriedades do sistema, conhecendo a excitação e a resposta (Lopes, et al., 2010).

3.1.1. Excitação Forçada

Uma das formas de excitar as estruturas com vista à realização dos ensaios de identificação dinâmica consiste na imposição de uma vibração. Este modo de excitação é particularmente interessante quando se pretendem ensaiar estruturas de elevada rigidez. Existem várias formas de efetuar a vibração forçada de uma estrutura, recorrendo a vibradores (mecânicos ou elétricos) fixos à estrutura, utilizando martelos de impulsos, ou ainda com recurso a explosões controladas.

3.1.2. Excitação Ambiental

Uma vez que atualmente existem sensores com sensibilidade suficiente para registar as respostas das estruturas quando sujeitas a excitações ambientais, é habitual a realização de ensaios de identificação dinâmica sem recorrer a nenhum meio de excitação forçada. Assim, as ações do vento, do tráfego rodoviário ou ferroviário, do funcionamento de equipamentos, de ondas marítimas ou quaisquer outras fontes presentes no local são responsáveis pela excitação das estruturas (Caetano, 1992). Desta forma é reforçado o carácter totalmente não destrutivo destes ensaios, uma vez que apenas se recorre à fixação de sensores que registam a resposta da estrutura, sem qualquer tipo de intrusão, salvaguardando completamente a sua integridade.

3.2. Ensaaios Dinâmicos Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos (NDT) são cada vez mais utilizados na caracterização de estruturas. A precisão dos resultados destes ensaios é importante na verificação da conservação e na reabilitação de estruturas.

As técnicas não destrutivas podem também ser usadas para a caracterização de estruturas, e têm a grande vantagem de não comprometer a sua utilização. As NDT são todas as técnicas que de uma maneira não destrutiva permitem a obtenção de informações sobre a estrutura em análise. Algumas destas técnicas estão em desenvolvimento contínuo, não havendo ainda, em alguns casos, precisão suficiente nos resultados obtidos. De referir que algumas técnicas consideradas não destrutivas são na verdade parcialmente destrutivas na medida em que podem danificar a superfície de ensaio, não tendo, no entanto, implicações a nível estrutural (Miranda, 2011).

Sempre que se intervém em património edificado é necessário fazer a sua caracterização material e estrutural, que sirva de base ao estudo/intervenção a realizar. Esse estudo pode ser motivado por fatores como a reabilitação do edifício para o mesmo ou diferente uso; monitorização estrutural; determinação do coeficiente de segurança, entre outros. Uma caracterização deficiente dos elementos existentes pode originar uma das seguintes situações: o reforço adotado ser insuficiente, podendo ser posta em causa a segurança dos utentes e do próprio edifício; o edifício ser reforçado para além do necessário, aumentando o custo e o nível de intrusão na obra (Miranda, 2011).

As recomendações do “Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios” (ICOMOS, 2001) sugerem que os trabalhos de reabilitação no património, incluindo os de caracterização, envolvam ações pouco intrusivas (Miranda, 2011).

A identificação dinâmica de estruturas constitui uma das técnicas atualmente mais utilizadas com vista à caracterização mecânica *in situ* de estruturas.

3.3. Identificação Dinâmica *In Situ*

3.3.1. Noções Gerais

Para determinar o comportamento das estruturas perante ações dinâmicas é necessária a utilização de parâmetros como rigidez, massa e amortecimento. Assim sendo, estes parâmetros são representados pela equação de equilíbrio dinâmico:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t) \quad (1)$$

em que M , C e K correspondem à matriz de massa, amortecimento e rigidez da estrutura, respetivamente, e da mesma forma \ddot{u} , \dot{u} e u são os vetores das acelerações, velocidades e deslocamentos resultantes das forças dinâmicas exteriores dadas pelo vetor $f(t)$.

Estes dados permitem determinar as características modais das estruturas, independentemente de serem as frequências próprias de vibração ou as deformadas modais associadas a cada frequência. Da mesma forma, e através de modelos numéricos, pode efetuar-se a avaliação da resposta das estruturas quando nelas atuam ações conhecidas, de carácter dinâmico ou estático (Fernandes, 2014).

Define-se modo de vibração como deformação associada a uma determinada frequência, sendo este um parâmetro abstrato. Pressupõe-se que o modo correspondente a uma determinada deformação é um modo isolado dos restantes. Estes modos podem ser interpretados como debilidades estruturais por estarem associados a fenómenos de ressonância (Fernandes, 2014).

Os modos de vibração representam somente a configuração da estrutura quando esta vibra com determinada frequência. Assim, o valor absoluto das componentes que constituem o vetor modo de vibração não têm qualquer significado, sendo somente importante a relação entre eles.

Assim sendo, o comportamento dinâmico das estruturas pode resumir-se a relações de excitação-resposta, de onde poderão surgir três tipos de problemas fundamentais:

- a) Problema direto – a excitação é caracterizada, tendo conhecimentos das propriedades da excitação e das características do sistema;

- b) Problema inverso – a excitação é caracterizada, sabendo as características do sistema e as da resposta;
- c) Problema da identificação de sistemas – caracterização das propriedades do sistema, conhecendo a excitação e a resposta.

As relações de excitação-resposta, são representadas pela equação que se segue, em que Y é a resposta, X a excitação e H a função de transferência que contém as informações relativas às características dinâmicas do sistema (Fernandes, 2014).

$$Y = H^2 \times X \quad (2)$$

Assim, sendo conhecida a excitação (X) e a resposta (Y), é possível determinar as características dinâmicas do sistema (H), bem como as frequências próprias de vibração, as deformadas modais e os coeficientes de amortecimento modal correspondentes. Posto isto, torna-se necessário proceder à excitação das estruturas para que seja possível registar a sua resposta. A excitação pode ser feita através de excitação forçada e vibração ambiental, como referido anteriormente.

3.3.2. Excitação Forçada

A excitação forçada permite a imposição de uma vibração na estrutura. É usada quando se pretende a realização de ensaios de identificação dinâmica em estruturas de elevada rigidez. Para proceder à aplicação de uma vibração forçada pode recorrer-se a vibradores fixos à estrutura, a martelos de impulsos, ou ainda, explosões controladas.

O método de imposição de vibrações através de vibradores fixados na estrutura, é vantajoso quando se pretende conhecer e/ou definir as características de excitação, dentro das limitações exigidas pelos equipamentos. Porém, tem como desvantagem, os custos inerentes à sua aquisição, transporte e utilização dos equipamentos, que são relativamente elevados. Posto isto, esta opção não costuma ser considerada.

Em relação aos martelos de impulsos, têm vantagens semelhantes às dos vibradores, porém acresce a vantagem de possibilidade de se conhecer com bastante rigor as características da excitação pois existe um transdutor de força na ponta, mesmo

sendo uma excitação impulsiva. Porém este tipo de excitação não se pode aplicar em estruturas de grande dimensão, e a normalização do impulso é dificultada uma vez que é aplicado manualmente.

O uso de explosivos é o método mais utilizado para introduzir vibrações numa estrutura, uma vez que permite a sua execução em condições onde o uso de outros métodos é dificultado. Tem como principal vantagem a facilidade de execução dos ensaios, comparativamente com os dois tipos de vibração referidos, porém o conhecimento das características da excitação é mais difícil.



Figura 7 - Preparação de Detonação de Explosivos (Lopes, et al., 2010)

3.3.3. Vibração Ambiental

Como já referido anteriormente, normalmente realizam-se ensaios de identificação dinâmica sem se recorrer a qualquer tipo de excitação forçada, uma vez que existem transdutores com sensibilidade suficiente para medir os mais pequenos movimentos existentes nas estruturas. No caso de estruturas mais rígidas, as respostas induzidas pelas ações ambiente têm amplitudes muito pequenas, tornando-se então necessário que os equipamentos sejam muito sensíveis para que da análise das respostas medidas se possa extrair informação de interesse sobre as características dos sistemas estruturais (Fernandes, 2014).

Além disso os transdutores também fornecem resposta adequada em frequência para a gama de frequências em que se encontram os principais modos de vibração das estruturas, ou seja, boa resposta para frequências baixas (Fernandes, 2014).

Assim sendo a excitação da estrutura é causada pelas ações do vento, tráfego rodoviário ou ferroviário, funcionamento de equipamentos entre outras fontes existentes

no local. Este tipo de ensaios consiste apenas na colocação de sensores que registam a resposta da estrutura salvaguardando completamente a integridade da mesma. São considerados ensaios não destrutivos.

Uma vez que a excitação ambiental acarreta custos mais reduzidos e proporciona uma maior facilidade de execução de ensaios de identificação dinâmica, quando comparados com ensaios através de excitação forçada, são estes ensaios que se utilizam na maior parte das situações. Outra das vantagens reside no facto de não ser necessário conhecer as características de excitação.

Por norma, num ensaio de excitação ambiental admite-se que a excitação da estrutura é do tipo puro, podendo ser também designado de ruído branco, quando esta se encontra sujeita a ações com características aleatórias e independentes. Ao ruído branco está associado um sinal com conteúdo energético semelhante para todas as frequências. Assim sendo, a excitação X , representada na Equação 2, toma um valor constante, obtendo-se então a Equação 3 (Lopes V. , 2009):

$$Y = H^2 \times \text{constante} \quad (3)$$

Assim sendo, à resposta Y podem ser aplicadas as propriedades da função de transferência H e, conseqüentemente, os picos da amplitude de H serão iguais aos picos da resposta Y . Através disso, a identificação das frequências próprias da estrutura, podem ser efetuadas através da sua análise.

3.4. Aquisição e Processamento de Sinal

Na monitorização de estruturas utilizam-se frequentemente sinais de saída dos transdutores do tipo analógico que apresentam características muito diversas. Posteriormente é necessário transformar os sinais de saída dos transdutores num sinal digital e para isso usam-se sistemas de aquisição, que permitem essa transformação. A partir do sinal transformado é possível a interpretação da resposta estrutural.

No início o sinal é convertido de forma a ser interpretado pelos restantes elementos do sistema de aquisição. São comuns as operações de linearização de resposta, de amplificação ou atenuação de sinal, de conversão de uma grandeza noutra (exemplo:

conversão da variação de resistência elétrica em tensão ou corrente) e de organização dos circuitos em ponte; aplicação de filtros anti-aliasing, entre outros (Fernandes, 2014).

Seguidamente será feita a conversão Analógico/Digital do sinal, na qual os sinais contínuos analógicos, provenientes dos transdutores, irão ser transformados em séries discretas no tempo e na amplitude, por processos de amostragem e quantização, respetivamente. Estas séries devem descrever o sinal analógico com suficiente precisão a nível de frequência, amplitude e fase (Fernandes, 2014).

Por fim, e após estas fases, os sinais digitais de saída estão prontos a serem armazenados e/ou processados na própria unidade ou então transmitidos diretamente para um computador como é comum nas placas de aquisição integradas em computadores por ligação USB ou interface PCI (Fernandes, 2014).

Nos problemas de identificação modal de estruturas, as grandezas medidas e registadas, sejam elas deslocamentos, velocidades ou acelerações, apresentam uma continuidade temporal, constituindo assim registos analógicos. Devido ao elevado desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos, os sistemas digitais tornaram-se indispensáveis, uma vez que permitem essencialmente uma maior capacidade de armazenamento de informação, um custo relativamente baixo e uma maior rapidez no que diz respeito ao tratamento da informação registada. Por isso mesmo, estes sistemas sofreram uma rápida implementação. O caso dos registos temporais de deslocamentos, velocidades ou acelerações de estruturas não é exceção, existindo hoje em dia grande aceitação destas tecnologias. Contudo, o uso destas técnicas implica o conhecimento dos erros associados e das formas de os tratar. A aplicação de técnicas digitais de processamento de sinal permite eliminar muitos dos erros existentes, possibilitando ao mesmo tempo a extração dos parâmetros pretendidos (Lopes V. , 2009)

3.4.1. Frequência de Amostragem e Tempo de Aquisição

A frequência de amostragem define-se como sendo a velocidade em que o conversor Analógico/Digital digitaliza o sinal, ou seja, o sinal é amostrado com o mesmo espaçamento no tempo, e esse espaçamento depende da frequência de amostragem.

A frequência de amostragem ideal tem que ser suficientemente elevada para que seja possível o conhecimento da resposta dentro da gama de frequências de interesse. Porém, esta frequência não deve ser extremamente elevada, pois isso irá aumentar os custos de armazenamento e tratamento associados.

Posto isto, deve ter-se em conta o teorema de amostragem de *Shannon*, que se traduz pela Equação 4:

$$f_s \geq \frac{f_{m\acute{a}x}}{2} = f_{Nyq} \quad (4)$$

Em que f_s representa a frequência de amostragem, $f_{m\acute{a}x}$ a frequência máxima e f_{Nyq} a frequência de *Nyquist* (Fernandes, 2014).

Outro conceito importante é o tempo de aquisição. Este parâmetro é fundamental em ensaios de vibração ambiental, para a identificação das propriedades dinâmicas das estruturas. Num ensaio deste tipo a aquisição de dados é feita essencialmente através do registo da resposta dinâmica da estrutura ao longo de um intervalo de tempo finito e pré-definido, conforme a Equação 5.

$$T \geq \frac{1000}{f_{min}} \quad (5)$$

Em que T representa o tempo de aquisição, em segundos, e f_{min} o valor da menor frequência da estrutura (Fernandes, 2014).

3.4.2. Erros

Num processo de medição é sempre recorrente a existência de erros. Estes existem devido à necessidade de calibração dos equipamentos e também ao conjunto de anomalias e erros associados à aquisição e processamento de sinal. Os erros são relevantes quando se pretende avaliar o rigor dos sinais obtidos experimentalmente ou adotar medidas para corrigir alguns dos erros a eles associados

3.4.2.1. Ruído Analógico

O ruído analógico é o fenómeno aleatório que perturba o conteúdo de interesse de um sinal e que se caracteriza por fazer surgir alguns picos nos sinais. Pode

ser causado pelos diversos componentes intervenientes no sistema de aquisição ou por influência de fatores externos, como a frequência da rede de distribuição de energia elétrica que induz uma oscilação periódica de 50.000 Hz não referente a vibrações das estruturas, devido a um mau isolamento ou má ligação à terra do sistema de medição (Pimentel, 2008); (Rodrigues, 2004)). O ruído pode advir também de vibrações reais, sem interesse para o estudo, mas que podem ser captadas em altas frequências devido à sensibilidade de alguns equipamentos (Pimentel, 2008).

Os principais fatores que influenciam o aparecimento de ruído são a sensibilidade dos sensores e a arquitetura dos sistemas de aquisição. Assim sendo, é necessária a avaliação da relação sinal-ruído nos ensaios de vibração ambiental aos quais estão associados baixos níveis de vibração.

Para minimizar a influência de ruído pós-aquisição de dados, podem aplicar-se filtro digitais elimina-banda em torno das bandas de frequência onde o ruído é mais significativo. Outra das formas mais adequadas para correção deste tipo de erro é a execução de uma correta montagem de todo o sistema de aquisição, nomeadamente no que diz respeito às ligação e qualidade dos cabos utilizados.

3.4.2.2. Tendências

As tendências são as variações lentas de um sinal, são por isso um fenómeno comum, e deve ter-se um cuidado especial na sua interpretação. As tendências podem dever-se à influência de outras grandezas nos sensores, aos efeitos da temperatura, mau funcionamento dos equipamentos ou componentes estáticas da resposta.

Para se eliminar as tendências não pretendidas, é usual a aplicação de filtros do tipo passa-alto, com uma frequência de corte próxima de zero ou, por meio da subtração de uma curva obtida através da interpolação da série temporal (Fernandes, 2014).

3.4.2.3. Perdas de Sinal

As perdas de sinal são caracterizadas por uma rápida quebra de sinal que pode ser momentânea ou permanente. Se a perda for momentânea, o motivo pode resumir-se a um mau funcionamento causado pela saturação dos transdutores. Caso exista uma quebra permanente, tal pode dever-se a uma falha na alimentação dos transdutores e/ou condicionadores ou a uma quebra de corrente.

3.4.2.4. Saturação de Sinal

Quando se dá um corte nos valores dos sinais correspondentes à entrada mínima ou máxima no sistema de aquisição, estamos perante uma saturação de sinal. Este é um tipo de problema que pode ocorrer devido à sensibilidade excessiva dos transdutores, ao ganho excessivo nos condicionadores de sinal, à incorreta definição do campo de medida, face às amplitudes de resposta expectáveis ou à falta de correção da linha de base dos aparelhos, um fenómeno comum nos acelerómetros.

Esta saturação tem como consequência a perda de informação durante determinados períodos de tempo. Basta observar os registos temporais para detetar facilmente esta perda de informação em sinais de tipo aleatório ou periódico, porém é mais difícil detetar em sinais transientes. Porém não é possível a correção ou atenuação no que diz respeito à saturação de sinal.

3.4.2.5. Erros de Escorregamento - *Leakage*

Um dos erros mais comuns neste tipo de registos trata-se do erro de *leakage*, que tem origem no carácter finito do processo de medição e na sua discretização. A impossibilidade de observar o sinal indefinidamente traduz-se na conversão da energia associada a uma frequência específica em energia distribuída numa gama de frequências em torno desta última. O aumento do tempo de aquisição de dados é sempre uma solução para minimizar o problema, contudo o consequente aumento do volume de informação faz aumentar os tempos de cálculo necessários

à manipulação da informação. O processo mais utilizado e que produz melhores resultados é o da aplicação de janelas de dados com uma forma distinta da retangular que reduzem as descontinuidades do sinal periodizado. O tipo de janela mais usada e mais eficaz no tratamento de sinais aleatórios é a janela de *Hanning* (Lopes V. , 2009).

3.4.2.6. Erros por Sobreposição - *Aliasing*

Outro erro recorrente nestes problemas trata-se do erro de *aliasing*. As suas causas advêm da operação de discretização do sinal contínuo no domínio do tempo, estando na origem do teorema de amostragem de *Shannon* que por vezes é designado por teorema de *Nyquist* (Fernandes, 2014).

Ocorre um rebatimento das frequências fora do intervalo definido pelas frequências de *Nyquist* em torno dos limites do intervalo, sobrepondo-se assim às frequências situadas no seu interior. A única forma de eliminar completamente este erro consiste na introdução de um filtro analógico, logo à saída dos transdutores, que elimine as frequências acima da frequência de *Nyquist* (Lopes V. , 2009).

Finalmente, refira-se ainda o erro designado por ruído analógico, podendo este ruído ser proveniente de qualquer elemento da cadeia de medição, incluído sensores ou mesmo as ligações entre diferentes elementos intervenientes. A correta montagem de todo o sistema de aquisição, com destaque para as ligações e a qualidade dos cabos, consiste na forma mais adequada para corrigir estes erros (Lopes V. , 2009).

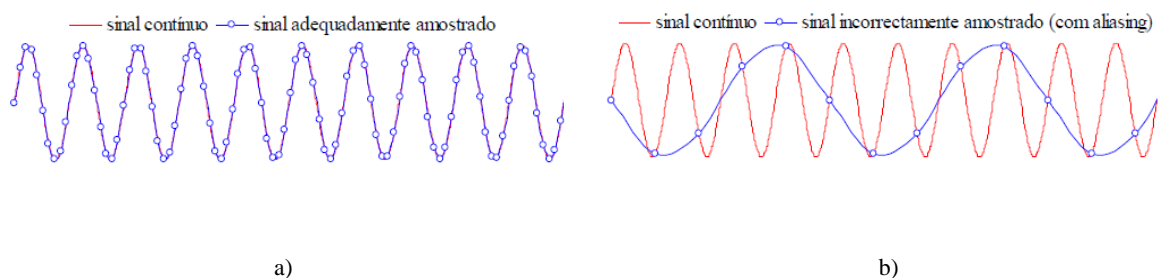


Figura 8 – Efeito de *aliasing*: a) Sinal de amostragem adequado; b) Sinal de amostragem deficiente (Fernandes, 2014)

3.4.3. Processamento de Sinal

Nos problemas de identificação modal de estruturas, as grandezas medidas e registadas, sejam elas deslocamentos, velocidades ou acelerações, apresentam uma continuidade temporal, constituindo assim registos analógicos. O desenvolvimento tecnológico registado nos últimos anos fez com que proliferassem os sistemas digitais em diversas áreas da sociedade. Os sistemas digitais permitem, acima de tudo, uma maior capacidade de armazenamento de informação, um custo associado relativamente baixo e uma maior rapidez de manipulação da informação registada. Todas estas vantagens conduziram à sua rápida e generalizada implementação. O caso dos registos temporais de deslocamentos, velocidades ou acelerações de estruturas não é exceção, existindo hoje em dia grande aceitação destas tecnologias. Contudo, o uso destas técnicas implica o conhecimento dos erros associados e das formas de os tratar. A aplicação de técnicas digitais de processamento de sinal permite também eliminar muitos dos erros existentes, possibilitando ao mesmo tempo a extração dos parâmetros pretendidos.

3.4.3.1. Aplicação de Filtros Digitais

Um filtro é um sistema colocado na entrada do sinal, tendo como objetivo a modificação desse sinal através da extração de alguns componentes sem interesse.

Os filtros que são aplicados a um sinal têm como objetivo eliminar frequências que não têm interesse para o estudo realizado e diminuir as consequências de fatores exteriores que perturbam o sinal (Figura 9). Este tipo de filtros são aplicados numericamente nos sinais resultantes da conversão analógico-digital, enquanto os filtros analógicos são aplicados diretamente aos sinais que provêm dos transdutores (Pimentel, 2008).

Apesar destes filtros serem uma ferramenta muito útil na interpretação dos sinais recolhidos, também tem alguns efeitos indesejáveis, como por exemplo a provocação de distorção de fase de sinal (Pimentel, 2008).



Figura 9– Funcionamento de um filtro (Caetano, Identificação Experimental de Parâmetros Dinâmicos em Sistemas Estruturais, 1992).

A aplicação deste tipo de filtros é frequente em sinais obtidos experimentalmente. Enquanto os filtros analógicos têm aplicação direta nos sinais contínuos provenientes dos transdutores e são uma aplicação de natureza física, tendo por isso um custo associado. Os filtros digitais são implementados numericamente nos sinais digitais resultantes da conversão Analógico/Digital (Pimentel, 2008); (Rodrigues, 2004)). Por outro lado, permitem também eliminar os erros associados ao ruído, às tendências, as componentes de sinal relativas a frequências fora da banda de interesse, e à separação das diversas componentes de sinal. Contudo, os filtros digitais não substituem os filtros analógicos relativamente aos erros de *aliasing*, sendo por isso necessário eliminar as componentes superiores à frequência de *Nyquist* antes da digitalização do sinal (Figura 10 a)) (Pimentel, 2008).

Os filtros mais utilizados classificam-se segundo o tipo de corte em frequência que introduzem. Assim sendo, classificam-se como filtro passa-baixo, passa-alto, passa-banda e elimina banda.

Um filtro passa-baixo elimina as componentes do sinal com frequências superiores à inferiores de corte f_c , enquanto que um filtro passa-alto permite apenas a passagem de componentes de sinal com frequências superiores a f_c .

Em relação aos filtros passa-banda e elimina-banda, estes equivalem a associações em série em filtros passa-baixo e a associações em paralelo em filtros passa-alto.

Os filtros reais apenas satisfazem estas condições de uma forma aproximada. Por norma, estes são caracterizados pela atenuação máxima da banda

de passagem, atenuação mínima na banda de atenuação e pelo declive na banda de transição. Enquanto um filtro ideal apresenta uma zona de transição com um rácio infinito, um filtro real apresenta uma banda de transição onde ocorre a variação de atenuação da resposta do filtro (Pimentel, 2008).

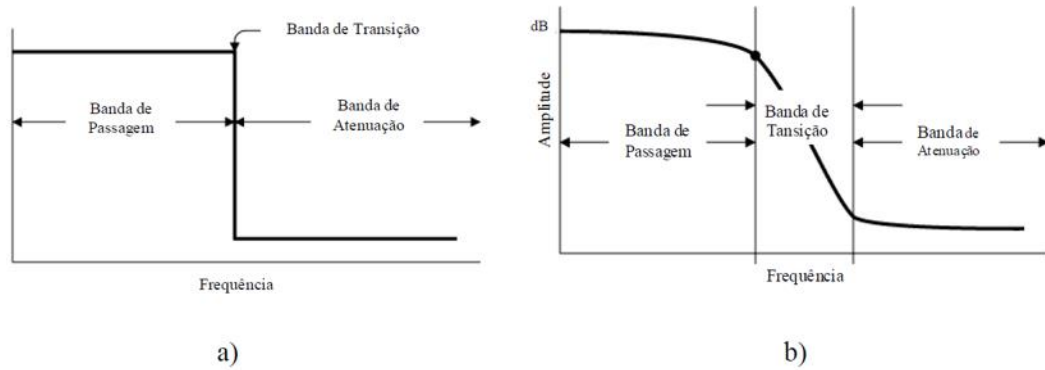


Figura 10 – Efeito de *aliasing*: a) Frequência de amostragem adequada e b) Frequência de amostragem deficiente (Pimentel, 2008)

3.4.3.2. Decimação

A decimação é um processo que consiste em reduzir a frequência de amostragem de um sinal previamente adquirido a uma determinada frequência. Tem como principal objetivo reduzir o espaço de memória dos registos temporais e como consequência, reduzir também o tempo de cálculo inerente a outras operações realizadas sobre esses mesmos registos.

O procedimento passa por eliminar, pelo menos, o conteúdo do sinal para frequências superiores à frequência de Nyquist da nova série através da aplicação de um filtro na banda de frequências de interesse. Seguidamente, é extraída uma amostra entre cada p amostras da série filtrada para que se crie uma nova série com uma frequência de amostragem $f_d = f_s/p$. Por meio de uma interpolação é possível obter a operação inversa (Pimentel, 2008).

3.5. Sistemas Clássicos de Medição

Na monitorização de estruturas é possível distinguir grandezas características das estruturas, como deslocamentos, rotações, velocidades e acelerações e também grandezas que caracterizam o comportamento local da estrutura, como tensões e extensões. Estas grandezas físicas podem ser convertidas em sinais elétricos proporcionais através de transdutores. Porém existem alguns transdutores que são associados a condicionadores de sinal, uma vez que em certos casos, o sinal elétrico de resposta, não se encontra numa forma apropriada para ser medida e processada diretamente. Assim sendo as funções desses condicionadores estão dependentes do tipo de transdutor utilizado, mas geralmente envolvem sinais de excitação, amplificação e filtragem dos sinais de resposta.

Um dos principais sistemas clássicos de medição que é habitualmente usado para monitorizar estruturas é o sistema de transdutores de aceleração.

3.5.1. Transdutores de Aceleração

Os transdutores de aceleração ou acelerómetros permitem medição de acelerações. Este tipo de transdutores são provavelmente os mais usados em ensaios dinâmicos de estruturas, tanto na análise de efeitos dinâmicos provocados por forças exteriores, bem como em ensaios de vibração ambiental. Tendo em conta a sua utilização no trabalho desenvolvido torna-se fundamental uma análise mais detalhada destes acelerómetros.

3.5.1.1. Acelerómetros Piezoelétricos

Os acelerómetros ou sensores de aceleração têm como objetivo fornecer a aceleração ou vibração, facultando um sinal elétrico segundo uma variação física, que neste caso é a aceleração ou vibração. Existem vários tipos de acelerómetros tais como: acelerómetros piezoresistivos, capacitivos ou piezoelétricos.

Os acelerómetros piezoelétricos (Figura 11 a); Figura 11 b)) são sensores que funcionam com base no princípio dos materiais piezoelétricos, como o quartzo, o gálio ortofosfato ou a turmalina. Quando estes materiais são sujeitos a

uma ação/deformação, eles geram uma carga elétrica que é proporcional a essa mesma aceleração/deformação (Fernandes, 2014).

Estes sensores são constituídos por uma massa, uma base e um elemento piezoelétrico (Fernandes, 2014). Para aplicar o princípio de funcionamento dos acelerômetros piezoelétricos existem diferentes configurações mecânicas que variam consoante a forma como a ação é aplicada aos cristais piezoelétricos. Os três tipos de configuração mais usuais são: funcionamento em flexão (Figura 12 a)), funcionamento em compressão (Figura 12 b)) e funcionamento em corte (Figura 12 c)) (Fernandes, 2014).

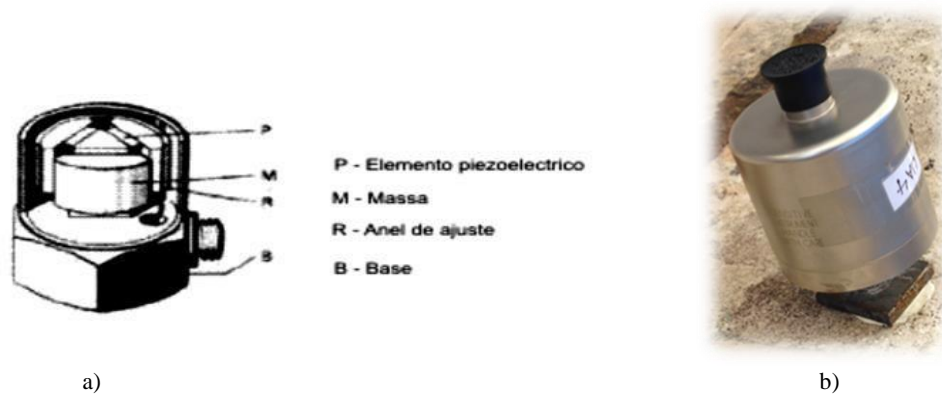


Figura 11 – Acelerómetro piezoelétrico: a) Esquema de constituição genérico (Fernandes, 2014); b) Exemplo.

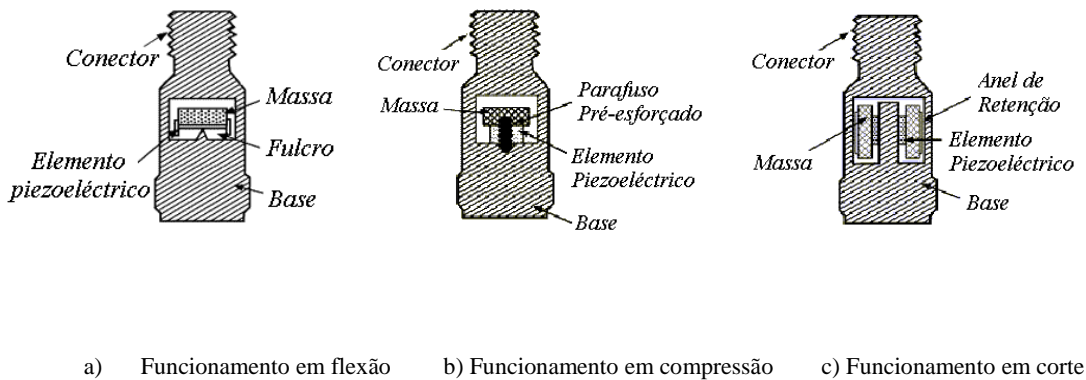


Figura 12 – Modos de funcionamento dos acelerómetros piezoelétricos: a) Funcionamento em flexão; b) Funcionamento em compressão; c) Funcionamento em corte (Fernandes, 2014)

A utilização de acelerómetros piezométricos prende-se com a razão de apresentarem, em geral, melhores características e maior estabilidade nas medições

relativamente a outros tipos de transdutores. Outra vantagem é o facto de apresentar uma resposta linear ao longo da gama de frequências mais sensíveis ao homem. Para que as vibrações mensuradas pelos acelerómetros sejam registadas é necessário conectá-los a registadores de movimentos (Margarido, 2013).

Na monitorização de estruturas, os acelerómetros piezoelétricos são os que mais frequentemente se utilizam. São considerados sensores ativos, uma vez que geram a própria energia elétrica a partir da energia mecânica obtida quando há deformação dos materiais piezoelétricos. Têm também uma grande capacidade de resistência às variações de temperatura, o que faz com que tenham uma grande estabilidade de durabilidade nas monitorizações de longa duração e permitir assim gerar um comportamento linear num espectro alargado de vibrações e respetivas frequências.

Porém existem algumas limitações, como a necessidade frequente de recalibração periódica do acelerómetro porque o material piezoelétrico envelhece com o tempo. Outra das desvantagens é que se tornam desadequados para monitorização de estruturas flexíveis de alto porte pois não fazem uma boa medição de componentes de vibração de baixa frequência e de pequena amplitude.

3.6. Sismógrafos

3.6.1. Noções Gerais

Os sismógrafos são aparelhos que medem os movimentos do solo e são compostos por um sismómetro e uma unidade de armazenamento de memória.

Os sismógrafos modernos convertem o sinal elétrico num sinal digital, o que é registado em suporte magnético. As vantagens dos registos digitais têm a ver com a sua elevada fiabilidade em comparação com os registos analógicos, além disso, já estão formatados para a possibilidade de processamento numérico por computador.

O sismómetro não é mais do que um sensor de vibração dos instrumentos sismográficos e um conversor que monitoriza a movimentação da superfície onde é colocado. Simplificando, um sismómetro não é mais do que um transdutor que transforma vibrações mecânicas em sinais de corrente elétrica, proporcionais à intensidade e à frequência dessas vibrações (Caetano, Cunha, & Magalhães, 2010). Os sismómetros podem classificar-se em ativos ou passivos. Os sismómetros passivos são os sismómetros que necessitam de energia elétrica externa para funcionar, enquanto que os sismómetros ativos não necessitam de energia elétrica externa.

3.6.2. Macro-sismógrafos

Nos ensaios que foram realizados neste trabalho, foi utilizado um macro-sismógrafo.

Este tipo de sismógrafo é capaz de registar acelerações provocadas pela ação de um sismo, explosões, trânsito rodoviário, entre outros.

Um macro sismógrafo é constituído por uma unidade independente, que contém transdutores, um sistema de alimentação e condicionamento dos transdutores, uma placa de conversão A/C, um processador que controla as condições de funcionamento do aparelho e uma unidade de memória onde são armazenados os dados recolhidos (Pinho, 2016).

Normalmente, este género de sismógrafos são configurados de forma a começarem a fazer o registo de acelerações quando, no sinal de um dos transdutores, se estabelece uma condição que foi definida previamente. Esta condição pode ser traduzida por um valor máximo ou por intermédio de uma relação que aponta para a existência de um aumento global dos níveis de acelerações.

Atualmente, existem macro-modelos que podem ser programados para que o início do armazenamento dos registos se efetue a uma determinada hora e data. Com esta forma de funcionamento, torna-se possível a identificação modal estocástica de estruturas através da utilização deste tipo de equipamento. Para tal, basta dispor vários aparelhos em diferentes pontos da estrutura e programá-los de modo a que iniciem o armazenamento dos registos no mesmo instante, desde que todos tenham os relógios acertados pela mesma referência (Rodrigues, 2004).



Figura 13 - Macro-sismógrafo da marca Nanometrics, modelo TitanSMA (Nanometrics, 2016)

4. Ensaio de Caracterização Dinâmica na Capela do Fundador

4.1. Introdução

O Departamento de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Leiria, deu início à avaliação da estrutura do mosteiro da Batalha, em colaboração com a direção do Mosteiro. Os objetivos baseavam-se na avaliação estrutural, bem como na avaliação de possíveis riscos para a degradação do monumento. Uma vez tratar-se de um monumento de extrema importância nacional, era pertinente a obtenção de informação que caracterizasse, até à data aquela estrutura.

Através da inspeção visual, não existia motivo de alarme aparente, porém deu-se início ao estudo do comportamento de uma estrutura isolada do mosteiro, a Capela do Fundador.

Inicialmente foram colocados acelerómetros que iriam possibilitar a obtenção dos modos de vibração da estrutura e posteriormente procedeu-se à colocação de um sismógrafo para obtenção das frequências próprias. Por fim, foram feitas as respetivas análises e avaliações dos resultados obtidos.



Figura 14 - Fotografia de Vigé & Plessix (1849 a 1873) (Vazão, 2015)



Figura 15 – Capela do Fundador (Vazão, 2015)

Nos últimos anos, a Engenharia de Estruturas, tem analisado vários problemas de vibrações em estruturas causadas por ações dinâmicas naturais ou implementadas inconscientemente pelo homem. A análise dinâmica pode ser caracterizada através de três propriedades fundamentais: os modos naturais de vibração, os fatores de amortecimento e as frequências próprias da estrutura.

Posto isto, a análise modal é um processo constituído por técnicas teóricas e experimentais, que possibilitam a construção de um modelo matemático que representará o comportamento dinâmico do sistema que se pretende estudar, com o objetivo de determinar os seus parâmetros modais.

As frequências próprias indicam a taxa de oscilação livre da estrutura depois de retirada a força que provocou o movimento da mesma, ou seja, representa a vibração da estrutura quando não há força aplicada sobre ela. Esta frequência é função direta da rigidez, e inversa da massa da estrutura, sendo designada por um número real positivo, e cuja unidade mais comum é o Hertz. Uma estrutura pode vibrar livremente, em várias direções após excitada por uma força por isso possui diversas frequências naturais. A frequência natural mais importante é a primeira, também designada por frequência fundamental e é a menor de todas.

Os modos de vibração são a forma como a estrutura vibra, e estão relacionados com cada uma das suas frequências naturais. Ou seja, para cada frequência natural existe um modo de vibração específico, ou um perfil de vibração.

4.2. Determinação de Frequências e Modos de Vibração através de Acelerómetros

4.2.1. Caracterização Geométrica da Estrutura

A capela do fundador situa-se do lado direito da nave principal do Mosteiro da Batalha. Tem como dimensões aproximadas 23x25x24m. Possui uma geometria quadrangular até uma altura de aproximadamente 13.50m e o restante é composto por uma torre octogonal.



Figura 16 – Alçado Sul do Mosteiro da Batalha – Capela do Fundador (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)



Figura 17 – Alçado Este do Mosteiro da Batalha – Capela do Fundador (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)



Figura 18 – Alçado Oeste do Mosteiro da Batalha – Capela do Fundador (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)

Nas Figuras 16, 17 e 18 é possível verificar a localização das aberturas existentes na estrutura da capela do fundador, bem como a sua morfologia e localização em relação ao monumento.

4.2.2. Sistema de Aquisição de Dados

A instrumentação utilizada no ensaio dinâmico da estrutura consistiu em:

- a) 4 acelerómetros unidireccionais piezoelétricos, da marca PCB Piezotronics®, modelo 393B31, com sensibilidade de 10.0 V/g, intervalo de leitura de frequências de 0.100 Hz a 200.000 Hz e gama de acelerações de 0.5 g (PCB Piezotronics, 2014a) e 4 acelerómetros unidireccionais piezoelétricos, modelo 393A03, com sensibilidade de 1000 mV/g, intervalo de leitura de frequências de 0.500 Hz a 2000.000 Hz e gama de acelerações entre -5.0 g e +5.0 g (PCB Piezotronics, 2014b);
- b) 8 cabos extensores;
- c) 1 placa de aquisição de dados com 8 canais, com uma resolução de 24 bits, incluindo filtros “antialiasing” (National Instruments, 2014);
- d) 1 computador portátil com o software desenvolvido para o controlo e aquisição dos dados do ensaio (Figura 19).



Figura 19 – Acelerómetros piezométricos e representação dos dados adquiridos

4.2.3. Setup de ensaio

Para avaliar o comportamento dinâmico da estrutura da Capela do Fundador, foram realizadas três *setups* distintos, dois no primeiro terraço da estrutura, ou seja, ao nível da cobertura principal (Patamar 13,50 metros). Posteriormente foi realizado um ensaio ao nível superior da torre octogonal (Patamar 22,00 metros), sempre com um ponto de referência comum a todos os *setups*.

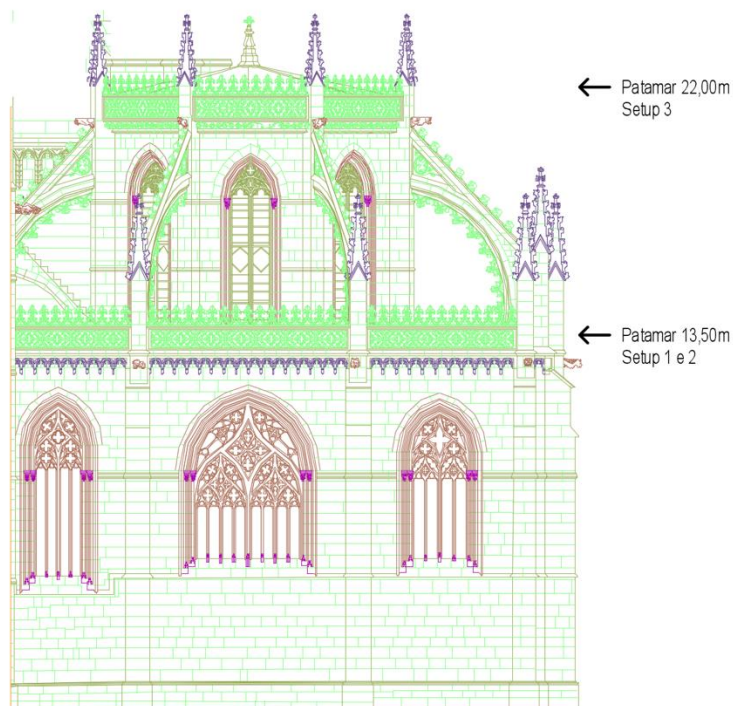


Figura 20 – Alçado Oeste do Mosteiro da Batalha – Capela do Fundador (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)

Para a realização dos ensaios foram usados 8 acelerómetros unidireccionais piezoelétricos. Para as medições do primeiro patamar foram necessários três setups uma vez que não era possível executar as mesmas ao longo do edifício só com 8 acelerómetros. Por isso as medições neste patamar foram feitas por duas fases, sendo que se consideraram 2 dos acelerómetros para o ponto de referência. Os dois acelerómetros considerados como referência foram colocados numa das extremidades da Capela (canto inferior direito da fachada Sul – Figura 22), e não foram removidos deste ponto durante todas as medições efetuadas. Os 6 acelerómetros restantes foram colocados em diferentes pontos da estrutura, de forma a captarem principalmente, as acelerações para os modos transversal, longitudinal e de torção. Foram estabelecidos o *Setup 1* e *Setup 2* e *Setup 3* (Figura 21).

Os acelerómetros de referência fizeram leituras em todos os *setups*, para que cada um deles tivesse um ponto de leitura comum, e assim se pudesse relacionar todas as outras leituras efetuadas.

Não foram realizadas medições com orientação vertical, pois o objetivo destes ensaios é caracterizar a resposta da estrutura em termos de deslocamentos modais horizontais, permitindo simular frequências próximas da gama de frequências a que as estruturas estão sujeitas aquando de uma ação sísmica.

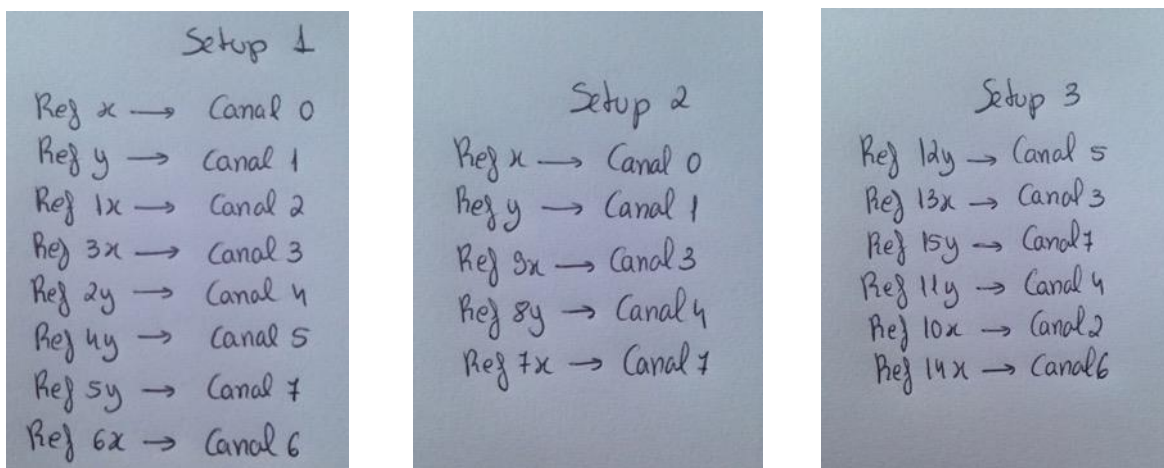


Figura 21 – Representação dos Setups considerados na medição das acelerações

Na Figura 21 está representada a planta com as dimensões de referência que se utilizaram, tanto para os ensaios como para o modelo de cálculo.

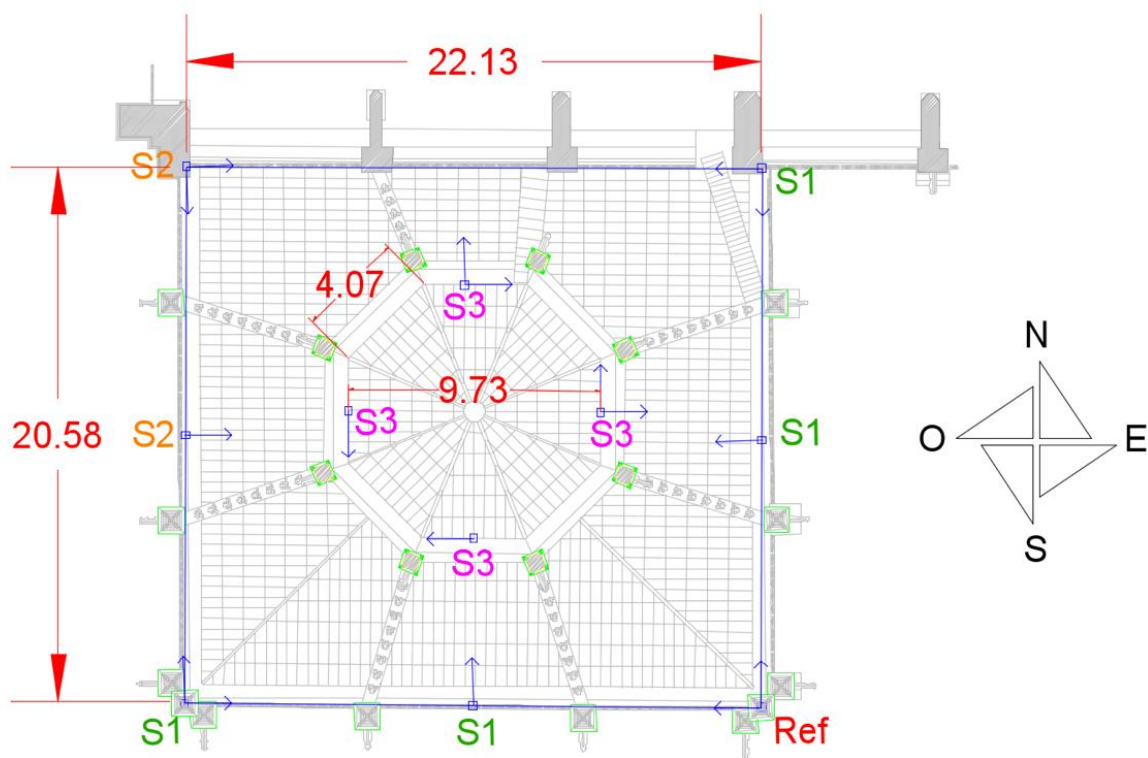


Figura 22 – Planta da Capela do Fundador com o esquema de Setups considerados

4.2.4. Resultados do ensaio

Os resultados obtidos, no final da realização dos ensaios, foram posteriormente tratados através do programa ARTEMIS Extractor®, versão 2011.

Primeiramente foi mudada a extensão do ficheiro obtido (.lvm) para outro tipo (.asc), de modo a que fosse possível abrir o programa e assim realizar o processamento dos sinais. Seguidamente foi projetada uma estrutura representativa da Capela do Fundador, através da definição de pontos e superfícies, de maneira a que depois do tratamento dos sinais, fosse possível a visualização da forma das deformadas modais.

A etapa seguinte, usando o auxílio do programa já mencionado, consistiu na passagem dos registos temporais para o domínio das frequências com base na técnica FDD. Esta técnica consiste no cálculo dos valores próprios das matrizes das densidades espectrais de potência da resposta, obtidas através dos auto-espectros e espectros cruzados

de cada ensaio (Neves, Costa, & Arêde, 2004). Simultaneamente, ocorreram alguns procedimentos de processamento de sinal de forma automática para reduzir ou eliminar os erros de *leakage* e *aliasing* através da aplicação de filtros de *Hanning* e passa-baixo, respetivamente (Lopes V. , 2009).

Seguiu-se a seleção dos picos dos espectros desses valores próprios, através da técnica de PP, permitindo assim obter as frequências naturais da estrutura.

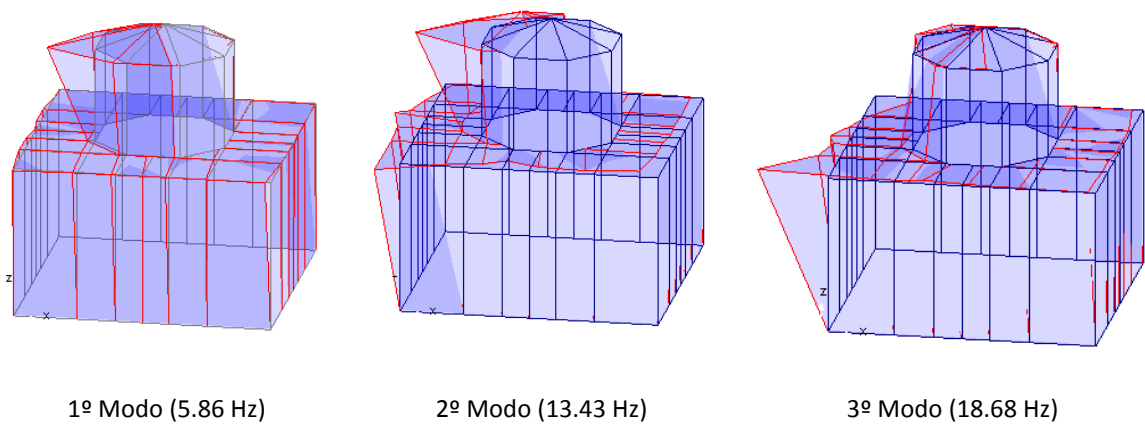


Figura 23 – Resultados experimentais das Frequências e Modos de Vibração

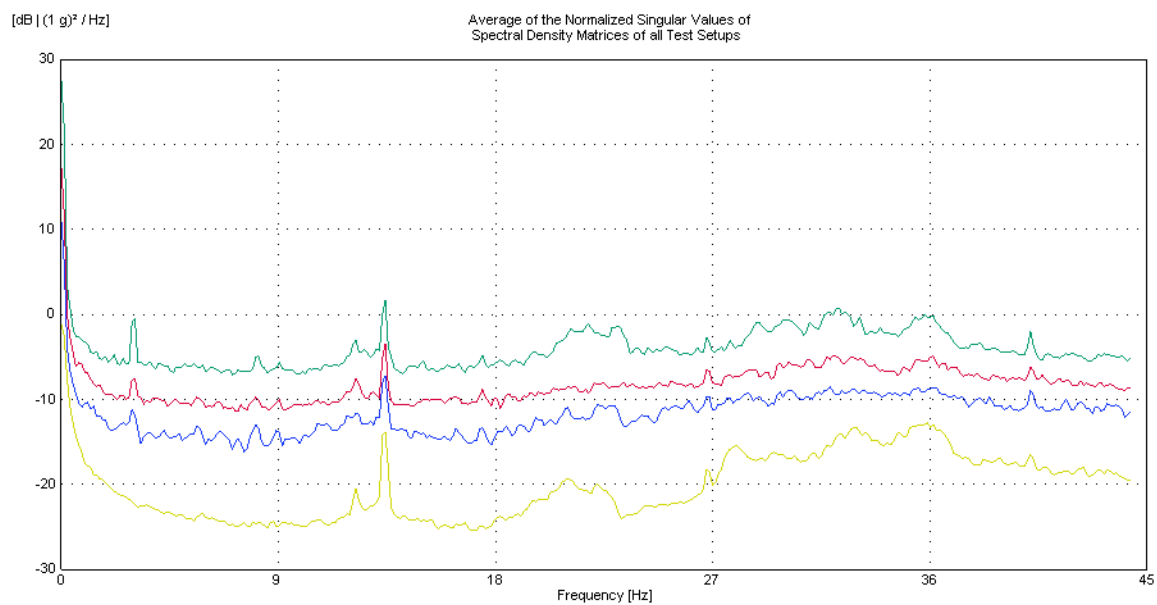


Figura 24 – Espectro de Fourier

Tabela 3 – Frequências e Modos de Vibração

Modos	Frequência (Hz)	Forma
1	5.86	Transversal da Copula
2	13.43	Transversal global
3	18.68	Transversal global

4.3. Determinação de Frequências Próprias com Sismógrafos

4.3.1. Introdução

Numa segunda fase foram avaliadas as frequências da estrutura apenas com um sismógrafo, que permite avaliar as acelerações de forma tridimensional, de uma forma expedita. Esta medição permite apenas avaliar as frequências próprias em cada ponto, não permitindo uma avaliação dos modos de vibração. Esta estratégia de medição é complementar a anterior, pois permite que seja repetida ao longo dos anos, monitorizando assim, de uma forma simples as frequências, procurando tendências na sua alteração. De notar que os sistemas de medida e tratamento dos resultados são diferentes, pelo que podem ser verificadas algumas diferenças nos resultados obtidos.

4.3.2. Sistema de Aquisição de Dados

As medições realizadas recorrendo ao sismógrafo consistiram na colocação do aparelho, também nos dois patamares da estrutura da Capela do Fundador, como aconteceu com o uso dos acelerómetros. Deste modo foi usado um sismógrafo, ou acelerómetro triaxial de movimento forte, nomeadamente o modelo TitanSMA da marca Nanometrics® (Figura 25), e de um computador portátil, como representa a Figura 26. Este sismógrafo ou acelerómetro triaxial, permite o registo de acelerações em três direções (duas horizontais e uma vertical), sendo o seu controlo feito através de um IP. Assim sendo, o armazenamento dos dados obtidos pode ser feito recorrendo a um cartão de memória ou no próprio IP, sendo possível o posterior download dos ficheiros.



Figura 25 - Sismógrafo de movimento forte, modelo TitanSMA da marca Nanometrics®



Figura 26 – Montagem do sistema de aquisição de dados para o ensaio dinâmico de vibração ambiental

4.3.3. Setup de ensaio

O ensaio dinâmico de vibração ambiental, realizado com recuso a um sismógrafo foi feito por duas fases. A primeira fase, consistiu na execução de medições no primeiro dos patamares da capela e posteriormente no patamar superior da torre octogonal, à semelhança do sucedido na medição feita utilizando os acelerómetros. As medições foram feitas em todo o perímetro da capela, e o sismógrafo ia sendo colocado nos pontos de referência indicados na Figura 27 e 28. A partir destes pontos foram feitas as medições das acelerações.

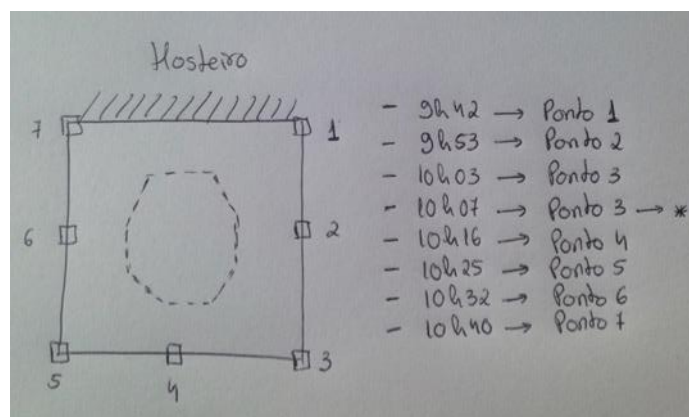


Figura 27 – Representação esquemática do *Setup 1*, considerado para a medição de acelerações usando o sismógrafo

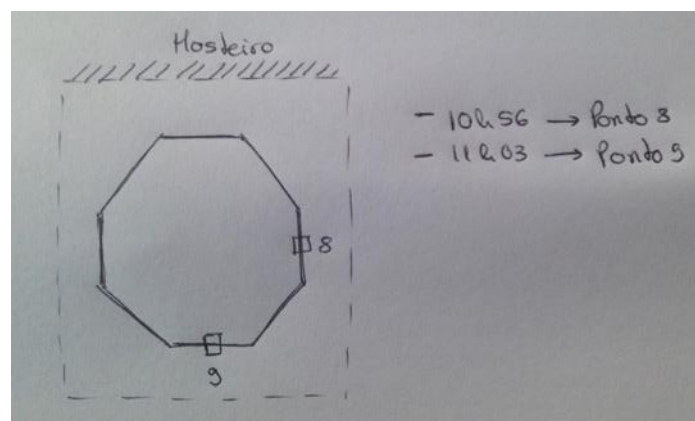


Figura 28 - Representação esquemática do *Setup 2*, considerado para a medição de acelerações usando o sismógrafo

4.3.4. Resultados

Dos registos de acelerações obtidas foram determinadas as correspondentes densidades espectrais de potência, com recurso a procedimentos baseados na transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), que fornecem uma estimativa das funções de transferência nos graus de liberdade instrumentados. Apoiando-se no software SismoSignal para a obtenção da transformada de Fourier, lista-se de seguida:

1. A sequência de operações efetuada no tratamento dos sinais: *Baseline* – Subtração do valor inicial a todos os outros valores
2. *Bandpass 0.1Hz-40Hz* – Seleção dos valores com frequências entre 0.1Hz e 40Hz
3. Determinação da FFT.

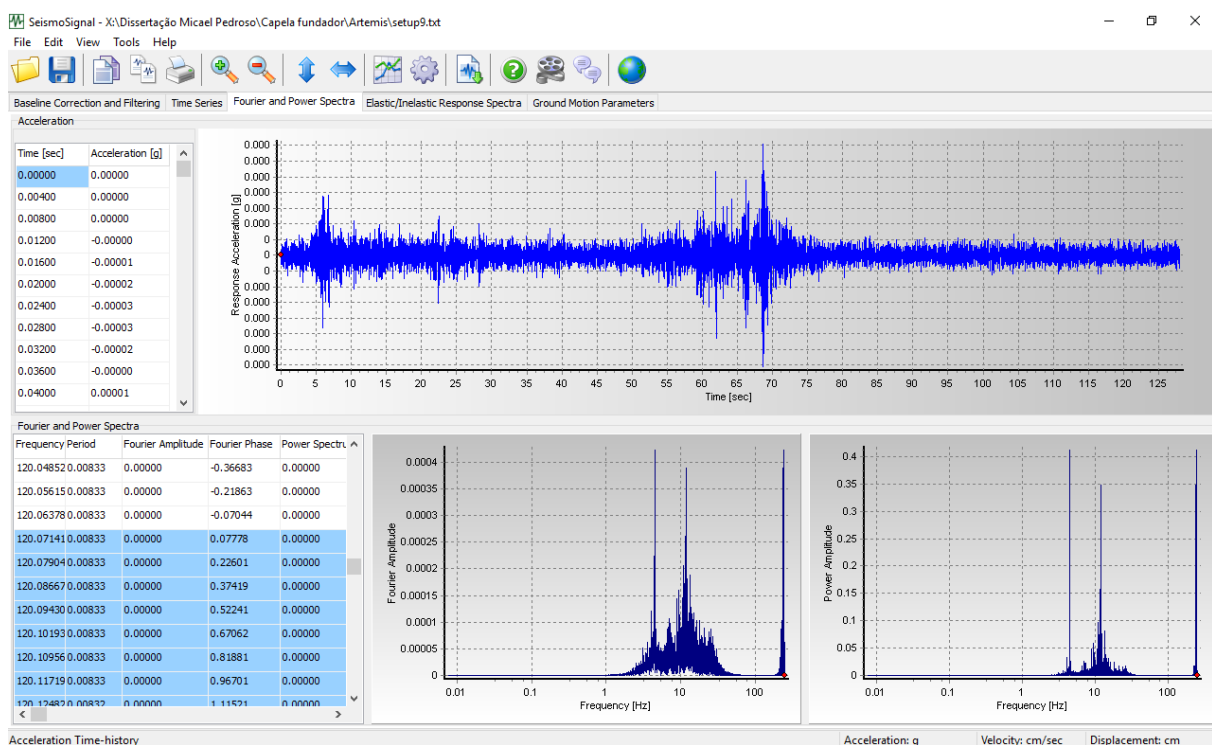


Figura 29 – Janela de análise do programa SeismoSignal

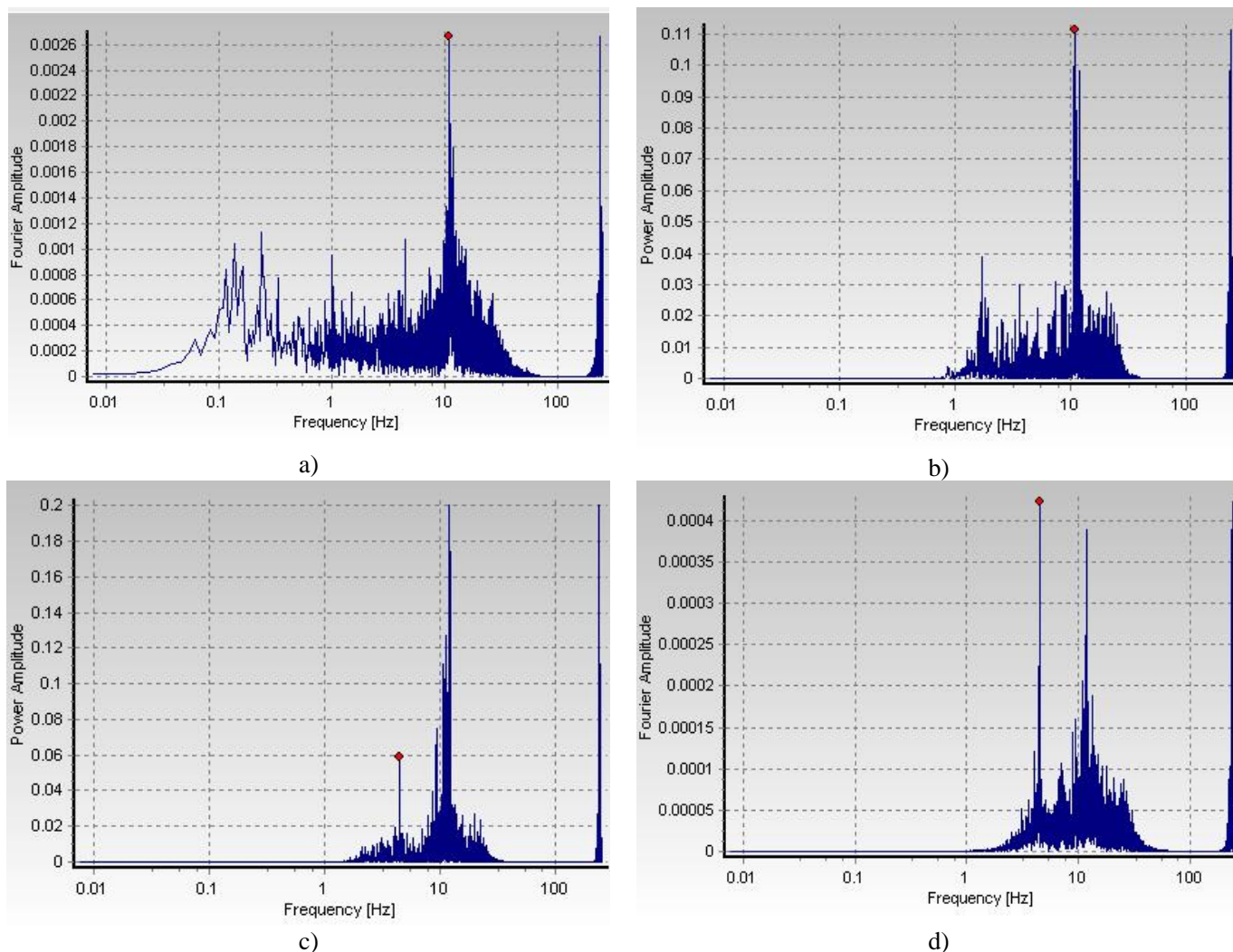


Figura 30 - Transformada de Fourier do registo das acelerações para os pontos de medição a) 3 na direção transversal; b) 5 na direção transversal; c) 9 na direção transversal; d) 9 na direção longitudinal.

Na Figura 30 apresentam-se os conteúdos espectrais em potência, obtidos a partir das acelerações medidas na capela do fundador (3, 5 e 9). Note-se que nesta campanha de medição de acelerações foram feitas nove medições, mas expõem-se apenas os resultados mais relevantes. A partir dos valores de pico desses espectros estimam-se as frequências naturais da estrutura na zona da capela sobre a qual foi feita cada medição.

As frequências de 10.8Hz e 12Hz estimadas para as acelerações medidas nos pontos 3 e 5 na base da cúpula e 4.46Hz na cúpula da capela com base no ponto 9, estarão associadas a modos de vibração que envolvem o movimento transversal em ambas as direções horizontais da estrutura (Figura 30).

O objetivo das medições efetuadas foi essencialmente estimar a frequência do sistema estrutural para comparação com as medições realizadas com acelerómetros uniaxiais. Quando comparados com os resultados obtidos com a identificação dinâmica, verificamos algumas diferenças, em especial no 3º modo. As frequências principais do primeiro modo da capela e da cúpula são próximas, ainda assim com diferenças significativas, o que demonstra que a técnicas utilizada, e o processo de tratamento tem uma influencia importante nos resultados obtidos.

5. Análise Estrutural

A metodologia mais simples de modelação de estruturas de edifícios antigos baseia-se nas técnicas correntes de modelação de edifícios pelo método dos Elementos Finitos. Nesta metodologia as várias componentes da estrutura (colunas, arcos, abóbadas, paredes, etc.) são modeladas através da combinação de elementos estruturais, nomeadamente elementos de viga, de laje ou de casca, para os quais se admite, em geral, um comportamento elástico linear. Por vezes são introduzidas artificialmente articulações ou módulos de elasticidade reduzidos, de forma a simular simplificadamente efeitos materiais não lineares (Gago, 2004).

Estes modelos simplificados de análise fornecem informações úteis para estudos preliminares e, em certas circunstâncias, consoante a dimensão e complexidade da estrutura, são uma boa alternativa (Gago, 2004).

Para que a modelação de uma estrutura seja válida e precisa, através do método dos elementos finitos, é necessário que o modelo seja bem representado fisicamente e que apresente uma lógica de valores depois de efetuados todos os cálculos. Dessa forma, e para que o resultado final seja o mais correto possível, devem ser tidos em conta os seguintes parâmetros: aproximação da geometria real, propriedades de materiais, condições e carregamentos de apoios, método de discretização e tipo de elemento utilizado.

Para o desenvolvimento do modelo numérico tridimensional da Capela do Fundador foi usado o programa de cálculo Autodesk Robot Structural Analysis Professional pelo método dos elementos finitos. Foi representada a capela do fundador usando as características geométricas fornecidas pelas plantas, alçados e cortes já existentes do monumento.

O modelo estrutural foi definido tendo em conta a caracterização da geometria da estrutura, as propriedades dos materiais, as condições de fronteira e as solicitações.

Das análises numéricas obtiveram-se resultados em termos de deslocamentos e tensões, para o peso próprio e combinação de ações sísmicas, que permitiram compreender e interpretar o comportamento da estrutura. Por uma questão de simplificação a avaliação inicial do comportamento estrutural, foi adotado um modelo de comportamento elástico-linear e isotrópico.

5.1. Descrição do Modelo Numérico

A geometria da capela foi definida através das plantas, alçados e cortes fornecidos pelo Mosteiro da Batalha, dados que foram completados com várias visitas técnicas ao local. O modelo global da estrutura foi representado por uma malha de elementos finitos, que se representa na Figura 31. Para as paredes, arcos e abobadas da cobertura foram utilizados elementos finitos de casca triangulares, de três nós, e retangulares de quatro nós, e foram utilizados elementos de barra para simular os contra-arcos. Resultou num modelo com um total de 27567 nós, com uma dimensão média dos elementos finitos de 15cm.

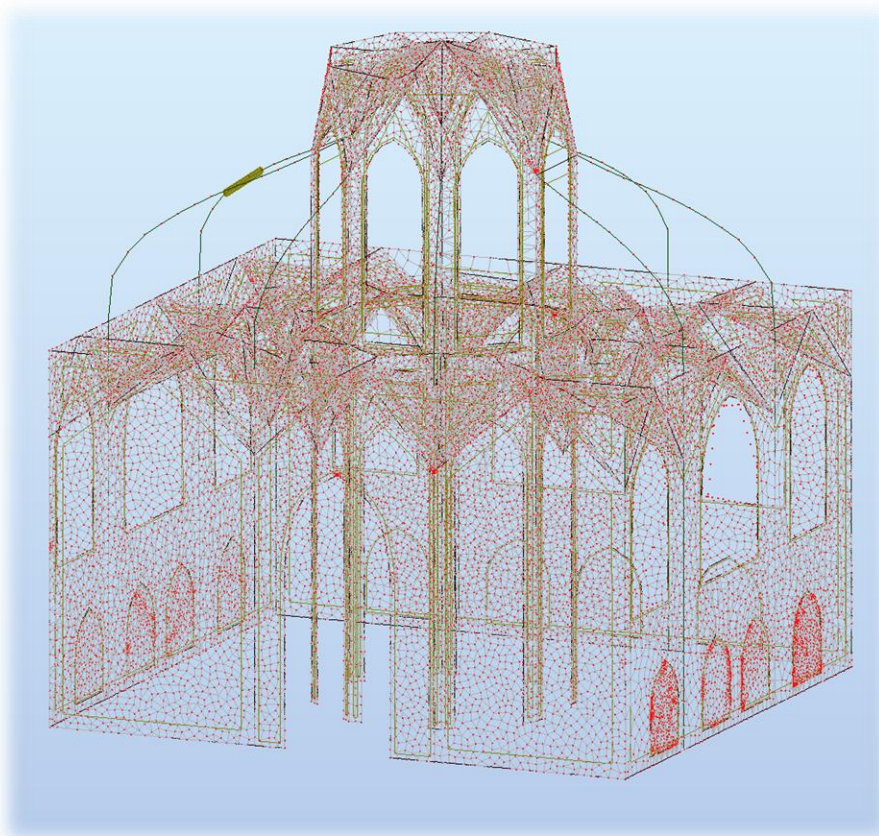


Figura 31 – Representação da malha do Modelo Numérico (Autodesk Robot Structural Analysis)

Para a construção do modelo, partiu-se inicialmente de uma planta de tetos, que englobava os dois patamares da cobertura, os seja foi considerada a planta de tetos geral. Foi a partir da planta de tetos que a estrutura foi sendo representada (Figura 32). Foi feita uma translação da zona do teto do octógono para a sua posição máxima de 24 metros, considerando a altura do primeiro patamar a 14 metros.

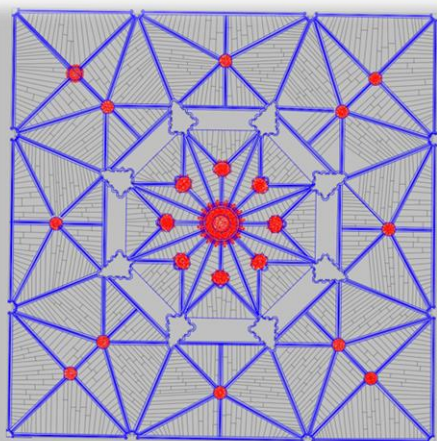


Figura 32 – Planta de Tetos (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)

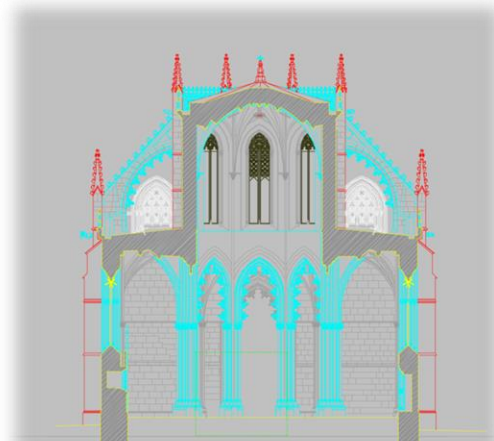


Figura 33 – Corte Transversal (Fonte: Direção do Mosteiro da Batalha)

A espessura da parede e dos tetos é variável, conforme é possível verificar na Figura 33. Deste modo, foram consideradas espessuras médias aproximadas.

Foram consideradas as condições de fronteira que melhor representam o comportamento real da estrutura, nomeadamente restrição dos deslocamentos (X, Y e Z) na base da estrutura, uma vez a estrutura apoia num solo de fundação, de aparentemente boa qualidade. Uma vez que a Capela está ligada à Igreja do Mosteiro, e dado que se pretende apenas estudar este elemento, foram definidas condições fronteira simplificadas para simular a ligação entre estes dois corpos. Esta simplificação, foi considerada, dada a diferença de rigidez dos dois corpos e será validada com base nas frequências experimentais medidas e já descritas no Capítulo 4. Assim foram considerados apoios duplos horizontais na ligação da extremidade da parede ao restante monumento.

5.2. Propriedades dos Materiais

O conhecimento das características físicas e mecânicas dos materiais é fundamental na avaliação do comportamento de qualquer tipo de estrutura quando submetida a solicitações de carácter estático e dinâmico. Esta preocupação deve ser mais pronunciada quando se trata de um edifício de interesse histórico. Contudo, na maioria dos casos, existem muitas incertezas associadas às propriedades destes materiais, devido à idade avançada e conseqüente degradação destas construções, às técnicas de construção e materiais utilizados, muito diferentes dos utilizados atualmente, à falta de documentação e estudos nestas áreas (Varum & Rodrigues, 2005).

Para uma representação mais correta do modelo estrutural na modelação do comportamento real, é necessária a realização de vários procedimentos para a recolha de dados. Assim sendo, os valores de base tiveram em conta as características dos materiais obtidos através de ensaios efetuados em trabalhos anteriores (ver Tabela 4), nos quais se observa uma grande diferença no módulo de elasticidade. Este facto prende-se com o valor obtido por Branco e Azevedo (1990) ser com base num provete isolado, e os valores obtidos por (Vazão, 2015) terem sido obtidos por métodos de ensaio indiretos no Mosteiro.

Tabela 4 – Propriedades do material adotado para o modelo numérico

Material	Mód. elasticidade E (MPa)	Peso volúmico (kN/m ³)
(Branco e Azevedo, 1990)	7000	22.94
Vazão (2015)	22500	

5.3. Ações Estáticas e dinâmicas

Nesta análise foram consideradas ações internas e externas, de forma a ser possível interpretar o comportamento da estrutura existente, verificar a segurança estrutural e prever o seu comportamento perante a ação do sismo. A ação interna considerada foi apenas o peso próprio e a ação externa considerada foi a ação sísmica (E).

A experiência demonstra que em algumas estruturas deste tipo, ou pelo menos em alguns elementos construtivos, algumas das patologias encontradas são devidas ao elevado nível de tensões instaladas na estrutura para a ação do seu próprio peso. No entanto, para certas combinações de ações, este poderá ter uma importante contribuição na estabilidade da estrutura (Varum & Rodrigues, 2005). Assim para os efeitos de análise estrutural, foram considerados apenas o peso próprio dos elementos estruturais, considerando valor do peso volúmico obtido por Branco e Azevedo (1990) de aproximadamente 23 kN/m³.

Para a definição da ação sísmica, foi considerado o Anexo Nacional, do Eurocódigo 8. O concelho da Batalha localiza-se numa Zona Sísmica 1.5 para uma ação sísmica Tipo 1 e 2.4 para uma ação sísmica Tipo 2. Assim sendo enquadra-se numa zona de baixa/moderada sismicidade, de acordo com o Eurocódigo 8. Embora não existem registos de ocorrências sísmicas muito relevantes nos últimos anos, é pertinente fazer este tipo de avaliação de danos, devido à importância da estrutura para o património cultural. Para a verificação da segurança estrutural foi calculado o coeficiente sísmico regulamentar de acordo com o EC8 considerando:

- i) Coeficiente de amortecimento de 10%;
- ii) Coeficiente de comportamento (q) de 1.0.

- iii) terreno tipo B – depósitos de areia muito compacta, de seixo ou de argila muito rija.
- iv) classe de importância III – Quadro 4.3 EC8 (Edifícios cuja resistência sísmica é importante tendo em vista as consequências associadas ao colapso).

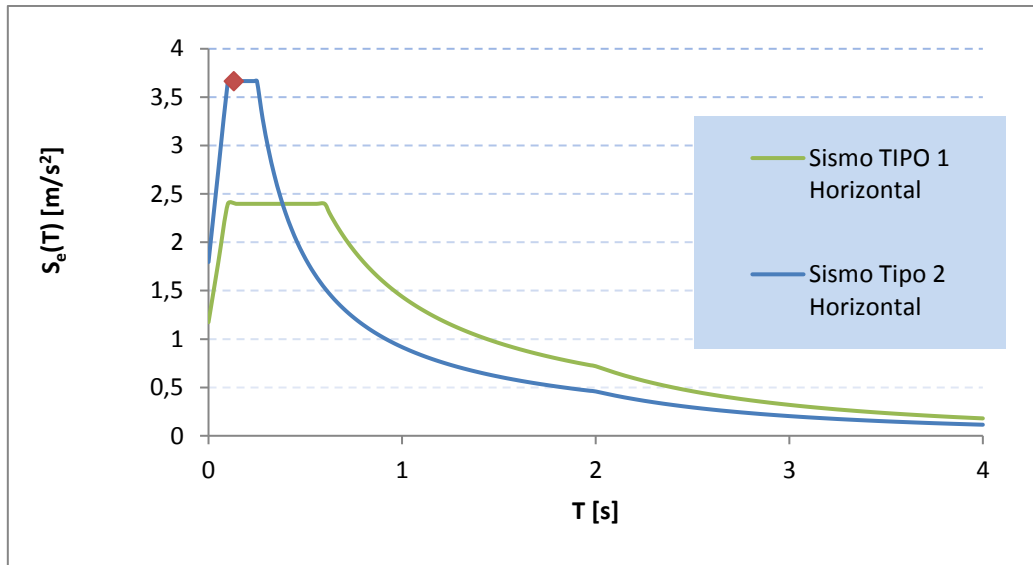


Figura 34 – Sobreposição Espectro Sismo Tipo 1 e Tipo 2

5.4. Calibração do Modelo Numérico

Após determinadas as frequências naturais e configurações modais obtidas a partir do ensaio de caracterização dinâmica apresentado no Capítulo 4, o modelo numérico foi calibrado/validado para as frequências obtidas experimentalmente. Esta calibração foi conseguida alterando o valor do módulo de elasticidade das alvenarias, através de tentativas. Procedeu-se à análise modal de cada vez que foram alterados parâmetros. Este processo iterativo foi repetido até ser atingido um erro mínimo entre os resultados numéricos e experimentais. Os resultados dos materiais considerados são apresentados na Tabela 5 e a comparação entre as frequências numéricas e experimentais são apresentadas na Tabela 6. Na Figura 35, Figura 36 e Figura 37 são apresentadas as configurações modais obtidas com o modelo numérico. Comparando com o resultado obtido experimentalmente é possível verificar que, no 1º Modo de vibração, o valor obtido numericamente é

praticamente igual ao valor obtido através dos ensaios experimentais. Porém no 2º e 3º Modos de vibração, os valores numéricos são próximos dos valores experimentais, mas têm uma diferença. Na Tabela 6 é possível verificar a comparação entre os valores obtidos para os três modos de vibração, numa e noutra situação.

Tabela 5 – Propriedades do material adotado para o modelo numérico

Material	Mód. elasticidade E (MPa)	Coef. de Poisson ν	Peso volúmico (kN/m ³)
alvenaria	21000	0.3	23

Tabela 6 – Resultados das frequências experimentais vs frequências numéricas

Modos	Frequência Experimental (Hz)	Frequência Numérica (Hz)
1	5.86	5.89
2	13.43	9.31
3	18.68	9.96

Segundo um trabalho desenvolvido por Branco e Azevedo (1990) sobre a análise da pedra do Mosteiro da Batalha, o módulo de elasticidade estático é de 7 GPa, um valor excessivamente pequeno quando comparado com o módulo de elasticidade estático referido por (Mockovciaková & Pandula, 2003) que foi de 56,5 GPa para pedra calcária (Vazão, 2015).

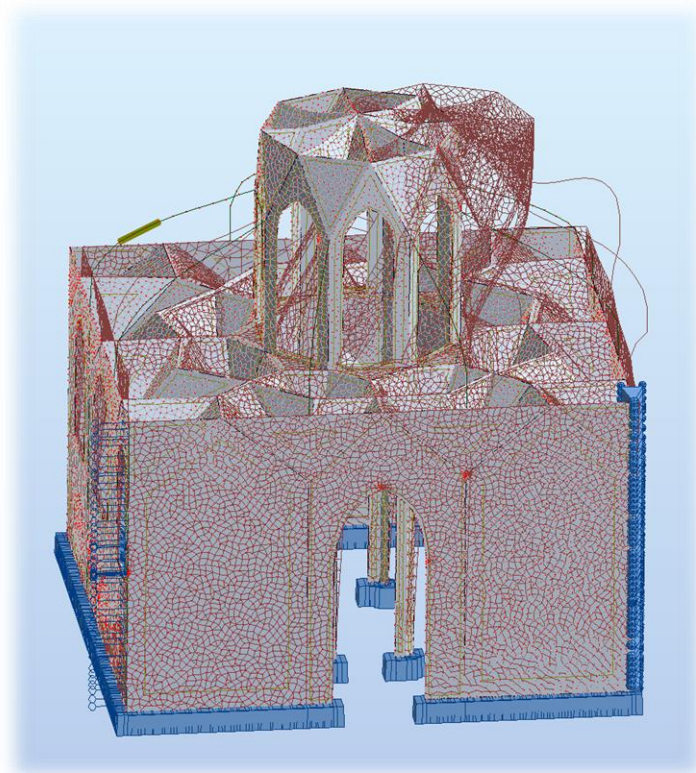


Figura 35 – Primeiro modo de vibração (Autodesk Robot Structural Analysis)

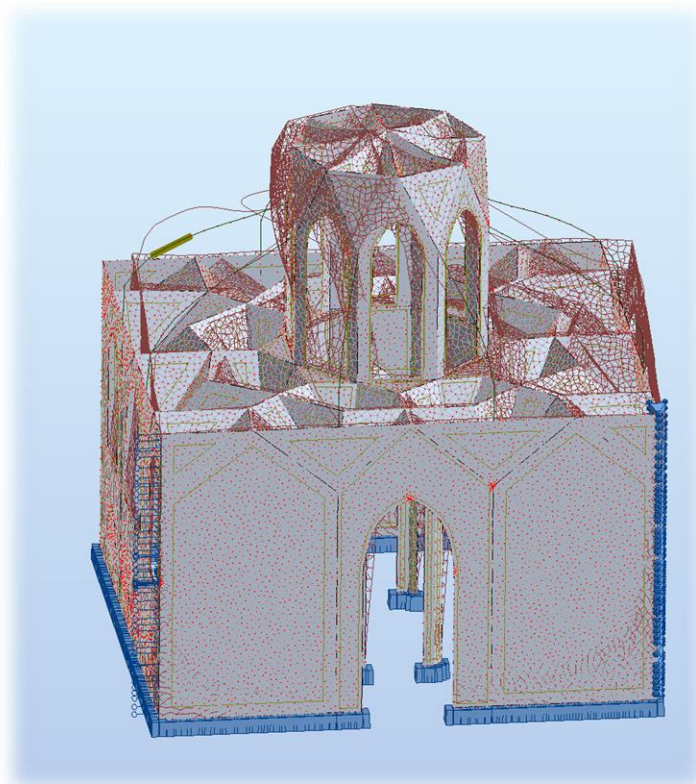


Figura 36 – Segundo modo de vibração (Autodesk Robot Structural Analysis)

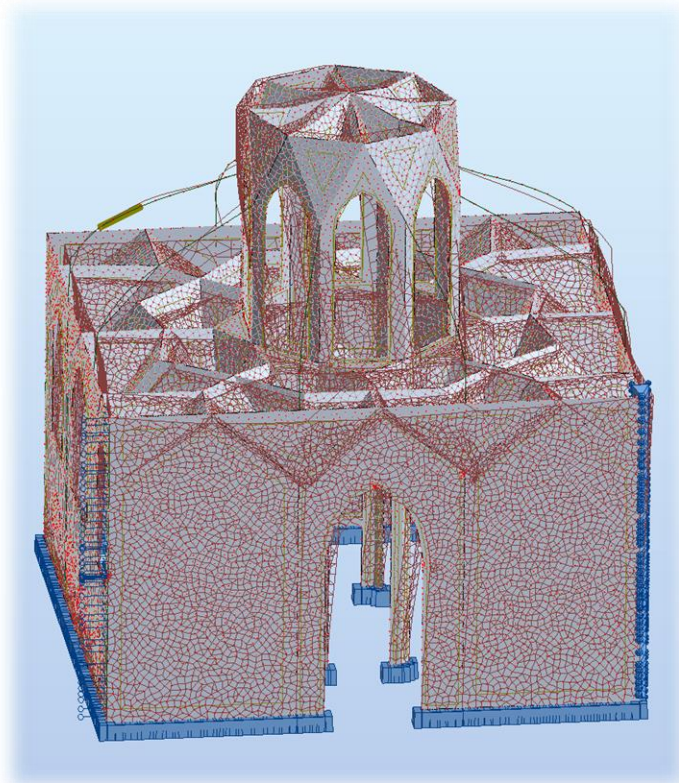


Figura 37 – Terceiro modo de vibração (Autodesk Robot Structural Analysis)

5.5. Estudos Paramétricos

Foi ainda realizada uma análise do modelo sem os apoios laterais, que simulam a ligação entre a capela e a estrutura do mosteiro. Os resultados obtidos para os modos de vibração, nessas condições, encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 7 – Comparação de Frequências para cada Modo de Vibração

Modos	Frequência Experimental (Hz)	Frequência Numérica c/ apoios laterais (Hz)	Frequência Numérica s/ apoios laterais (Hz)
1	5.86	5.89	5.56
2	13.43	9.31	8.59
3	18.68	9.96	9.99

É possível verificar que a frequência de vibração e os modos apresentam uma ligeira redução, como era expectável, uma vez que a estrutura sem os apoios laterais, se torna ligeiramente menos rígida. No entanto a primeira frequência continua a ser dominada pela cúpula da Capela do Fundador, não tendo qualquer participação da estrutura do mosteiro, e a elevada rigidez da capela, conferida pela elevada espessura das paredes, e pela reduzida altura não é significativamente alterada por esta ligação (Figura 38, Figura 39 e Figura 40).

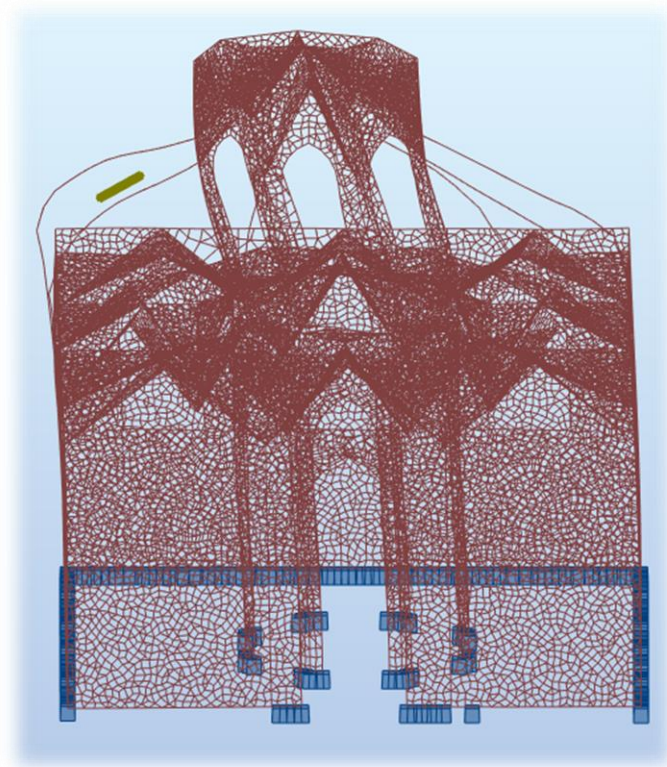


Figura 38 – Primeiro modo de vibração – Estrutura s/ apoios laterais
(Autodesk Robot Structural Analysis)

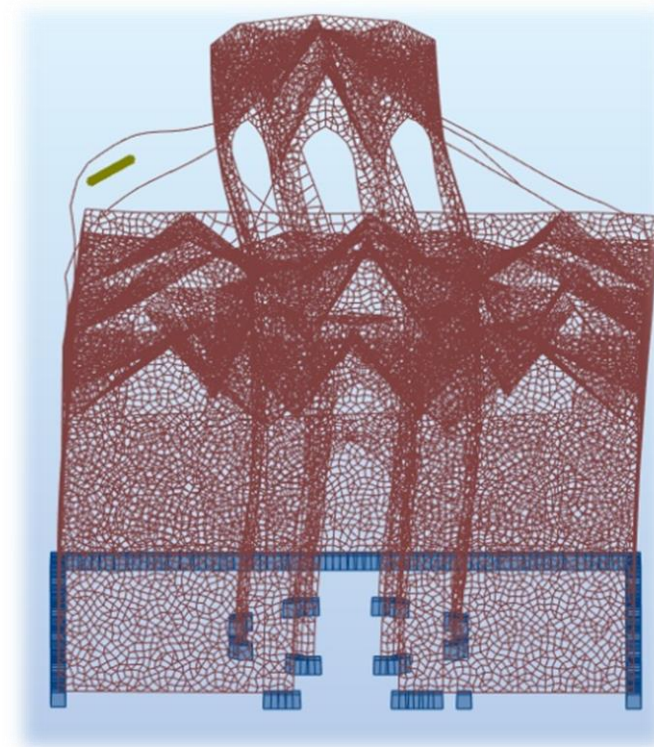


Figura 39 – Segundo modo de vibração – Estrutura s/ apoios laterais
(Autodesk Robot Structural Analysis)

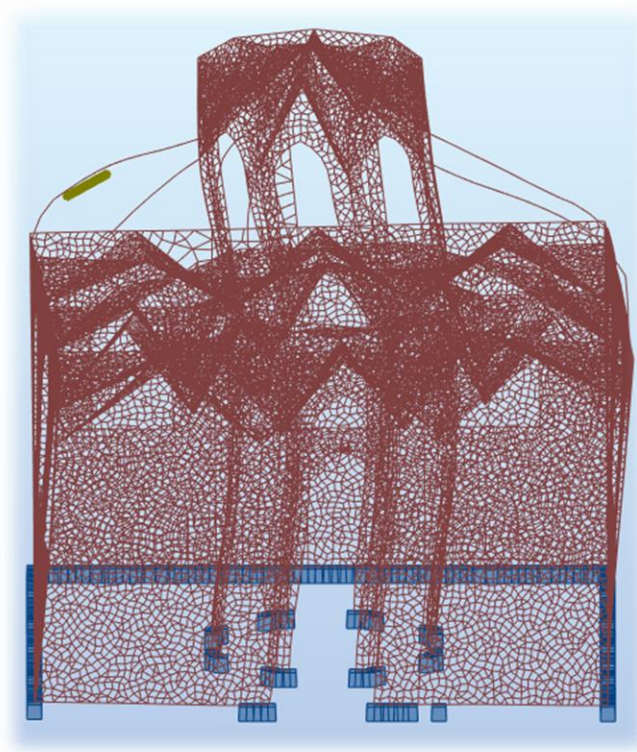


Figura 40 – Terceiro modo de vibração – Estrutura s/ apoios laterais
(Autodesk Robot Structural Analysis)

Foi realizada uma avaliação dos valores da variação do Módulo de Elasticidade (E), avaliando assim por um lado a influência das propriedades materiais na resposta estrutural, em particular a incerteza na sua avaliação, e por outro lado, partindo do princípio que o módulo de elasticidade de referência, representa a situação atual, as reduções do Módulo de Elasticidade avaliadas, podem representar a possível degradação dos materiais ao longo do tempo. A Tabela 8 apresenta os valores das frequências de vibração dos três primeiros modos de vibração, tendo em conta a variação do Módulo de Elasticidade. Verifica-se que, quanto maior for o módulo de elasticidade da estrutura, maior será a frequência de vibração, no entanto esta variação não é muito significativa, uma vez que a rigidez da estrutura é muito condicionada pela geometria da mesma.

Tabela 8 – Tabela de Modos de Vibração com Variação do Módulo de Elasticidade

	Primeiro Modo de Vibração (Hz)	Segundo Modo de Vibração (Hz)	Terceiro Modo de Vibração (Hz)
E = E - 40%E	5,16 (12%)	7,85 (15,7%)	8,19 (18%)
E = E - 30%E	5,37 (8,8%)	8,27 (10%)	8,67 (13%)
E = E - 20%E	5,56 (5,6%)	8,64 (7%)	9,12 (8,4%)
E = E - 10%E	5,74 (2,5%)	8,99 (3,4%)	9,55 (4,1%)
E = E + 10%E	6,04 (2,5%)	9,61 (3%)	10,35 (3,9%)
E = E + 20%E	6,18 (5%)	9,90 (6%)	10,70 (7,4%)
E = E + 30%E	6,30 (7%)	10,17 (9%)	10,73 (7,7%)
E = E + 40%E	6,43 (9%)	10,43 (12%)	10,75 (7,9%)

5.6. Verificação de Segurança

5.6.1. Análise das Ações Gravíticas

Os resultados que se seguem, foram obtidos através de uma análise linear elástica, e são apresentados em termos de tensões principais máximas de compressão e tração apenas considerando as ações gravíticas.

Analisando apenas as tensões principais máximas de compressão, é possível constatar que, tal como se pode verificar na Figura 41, se verificam os maiores níveis de tensão de compressão junto aos pilares centrais dos arcos interiores de ligação à cúpula e na base das paredes exteriores. Em relação à tensão máxima principal de compressão nos pilares o seu valor máximo é aproximadamente 2.20MPa, e na base das paredes 0.35MPa, valor significativamente inferior ao máximo espectável, 22MPa, de acordo com a Figura 41.

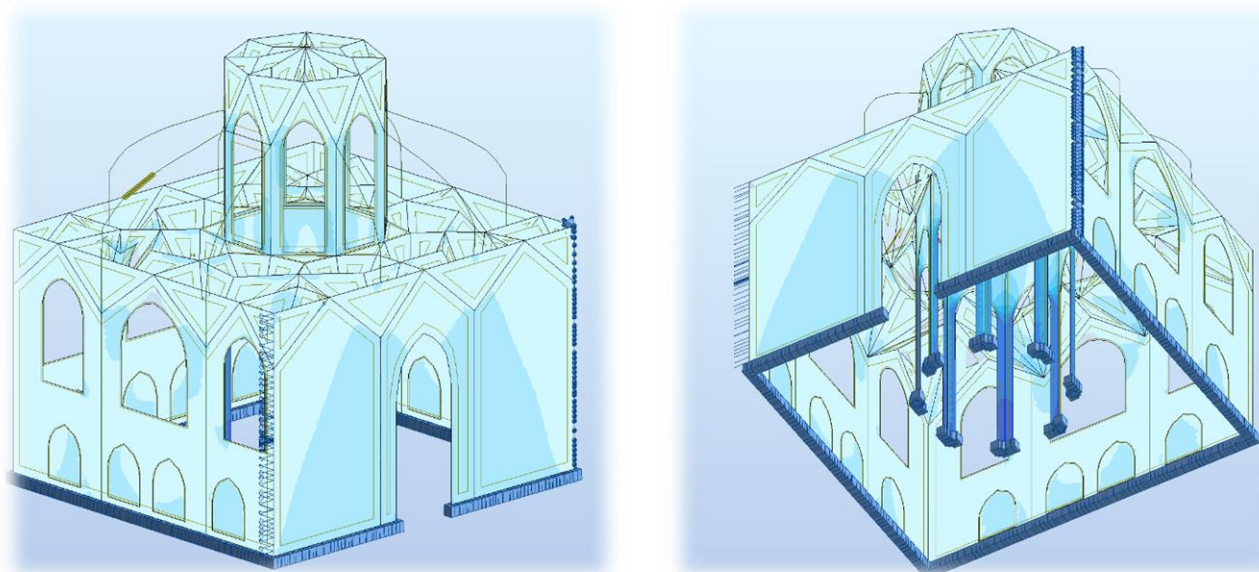


Figura 41 – Tensões máximas de compressão (Autodesk Robot Structural Analysis)

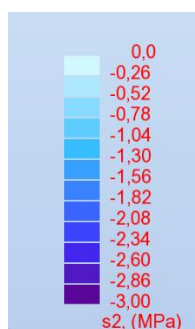


Figura 42 – Escala das tensões máximas de compressão

Na Figura 43 e Figura 44 são apresentados os mapas das tensões principais máximas de tração. O valor máximo de tensão principal de tração, para o nível de carregamento instalado, é aproximadamente 1.0 MPa e ocorre nos arcos interiores de ligação à cúpula e nas aberturas da cúpula. Pela análise da Figura 43, existem zonas que excedem o valor da tensão de cedência, σ_t , de 0.15 MPa, valor indicado na bibliografia (Szolomocki, 2009) e (Milani, Milani, & Tralli, 2008). A distribuição de tensões apresentada é correlacionável com o padrão de fissuração nas aberturas da cúpula observadas na Capela do Fundador.

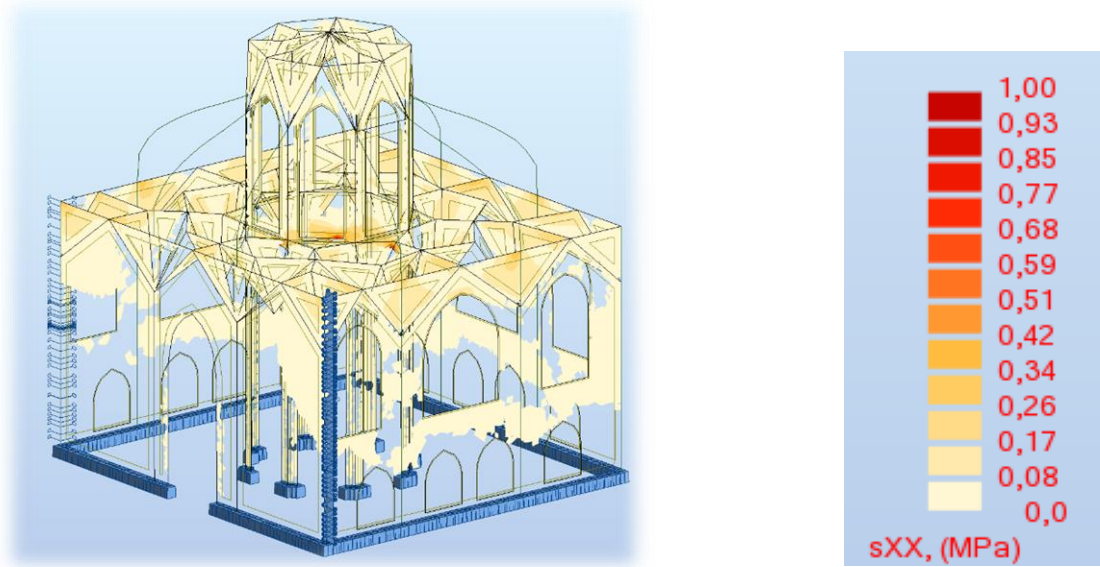


Figura 43 – Tensões máximas de tração (Autodesk Robot Structural Analysis)

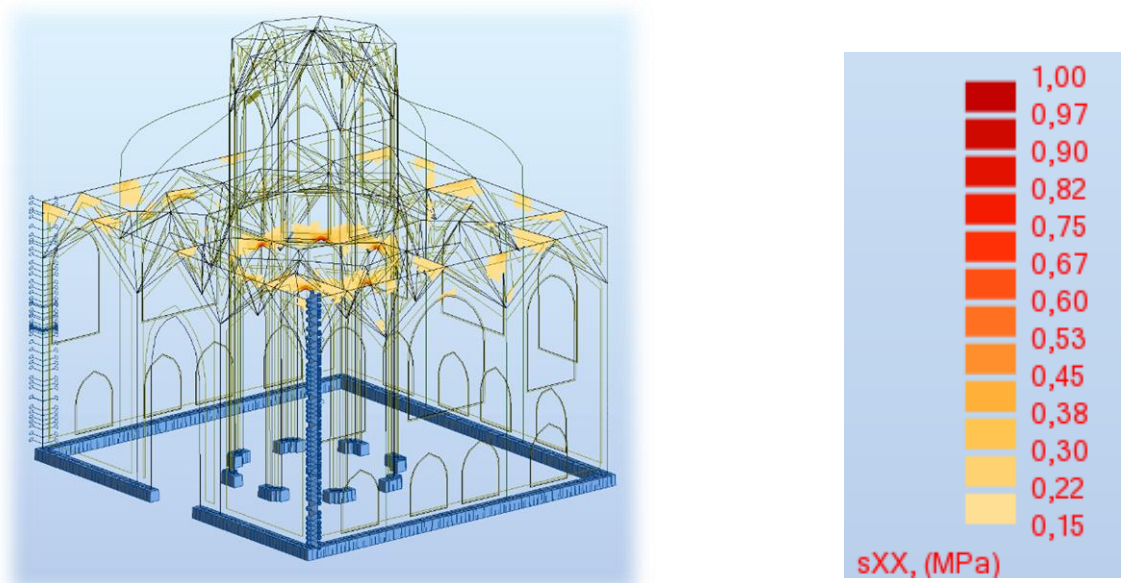


Figura 44 – Tensões máximas de tração (Autodesk Robot Structural Analysis)



Figura 45 – Exemplo de Fissuração nas zonas de maior tensão (Vazão, 2015)

5.6.2. Ação Sísmica

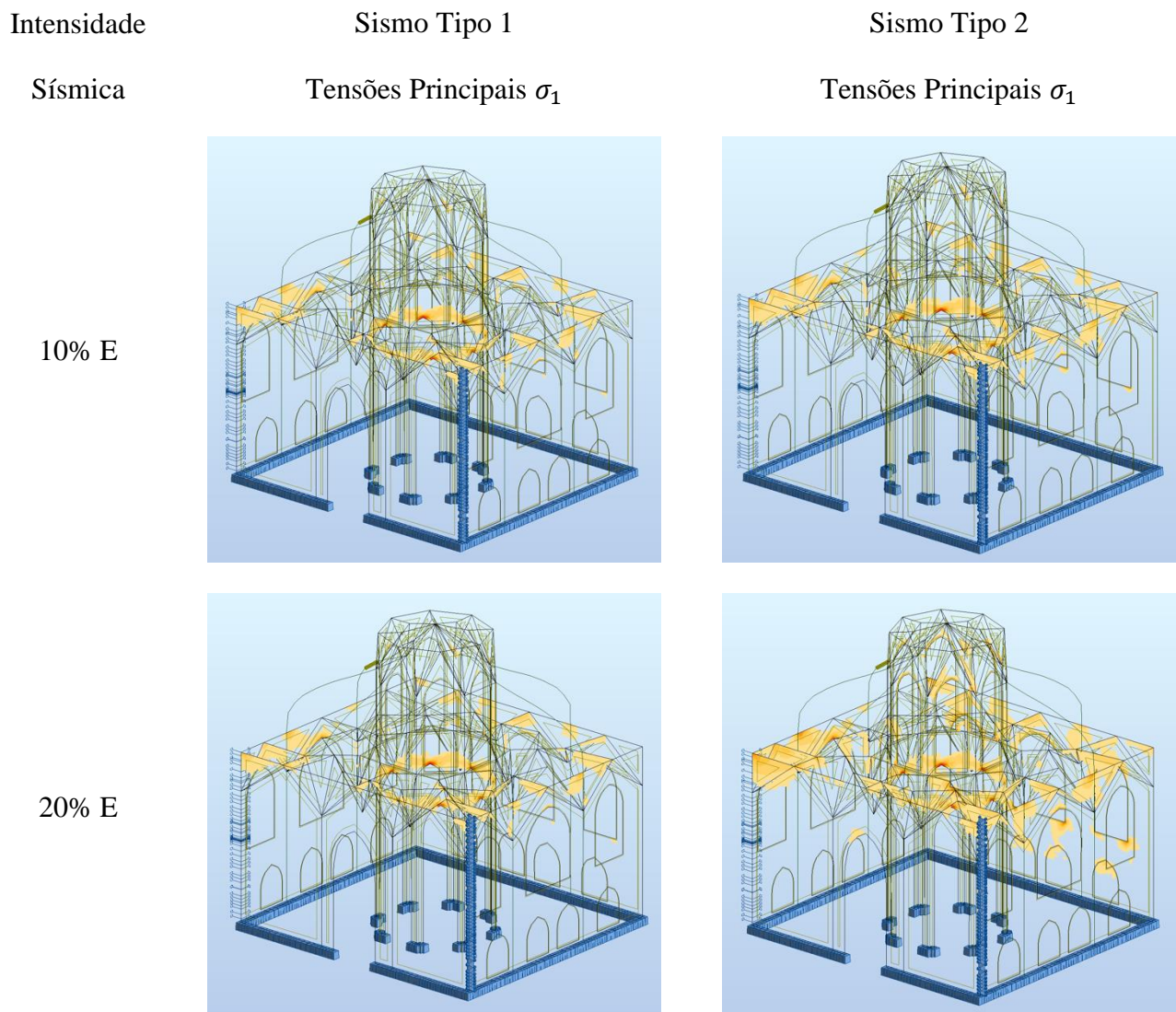
Para que fosse possível interpretar quais os possíveis danos a verificar na estrutura, e de modo a investigar a possibilidade de os danos existentes terem sido causados por esse tipo de ocorrência, foi considerada uma ação sísmica de intensidade crescente ($1.0G+\alpha E$). Com α a variar de 0.1 a 1. Uma vez que a situação mais desfavorável para a estabilidade da estrutura corresponde ao sismo a atuar na direção perpendicular à capela, foi considerado o sismo apenas para a direção y. Esta ação foi então simulada recorrendo a uma análise por espectros de resposta, considerando a ação do tipo 1 e do tipo 2, de acordo como Eurocódigo 8, e com os pressupostos descritos anteriormente.

Foram então aplicadas ações sísmicas de intensidade crescente (0.1 a 1E) sobre a estrutura. Na Tabela 9 apresentam-se os resultados destas análises em termos de tensões principais máximas (σ_1) positivas, para valores de tensão de cedência superiores

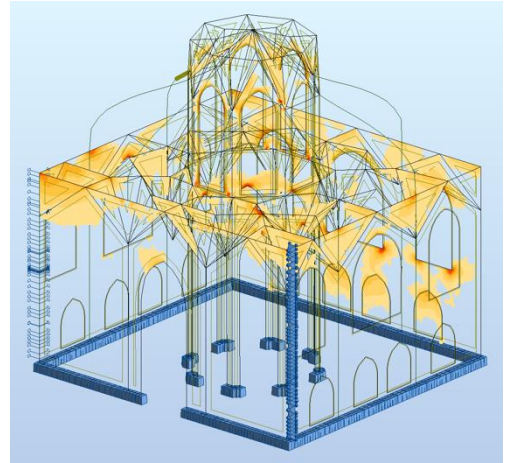
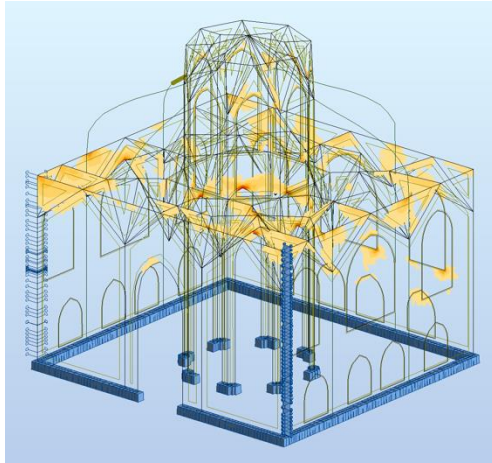
ao valor de 0.15 MPa. Os resultados permitem visualizar a evolução do dano na estrutura para sismos de intensidade crescente.

Da análise sísmica efetuada pode concluir-se que sismos ocorridos, mesmo de baixa intensidade (60% da aceleração de projeto, 0.22g), podem ter agravado os danos causados pelo peso próprio. Um sismo com a intensidade regulamentar (~0.37g) produziria uma distribuição de dano generalizada, e até o provável colapso da estrutura existente.

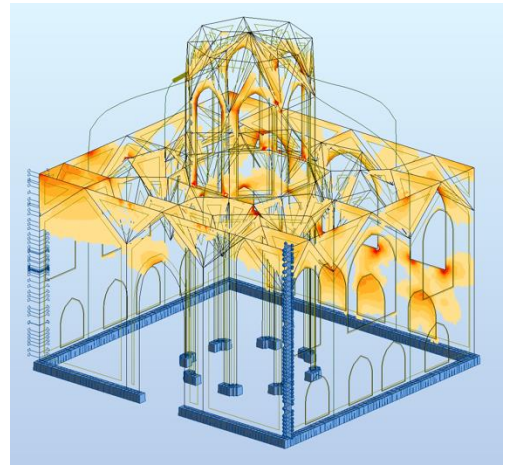
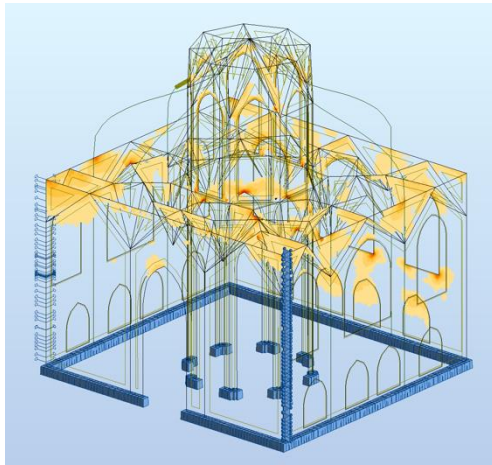
Tabela 9 – Tensões de Tração para a ação sísmica (Autodesk Robot Structural Analysis)



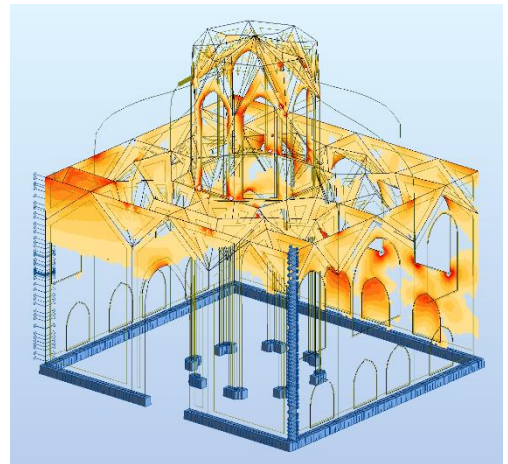
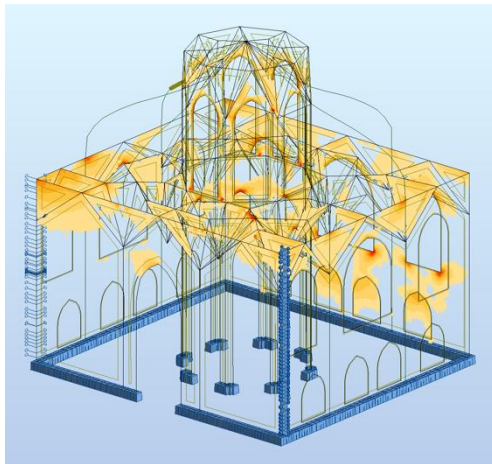
30% E



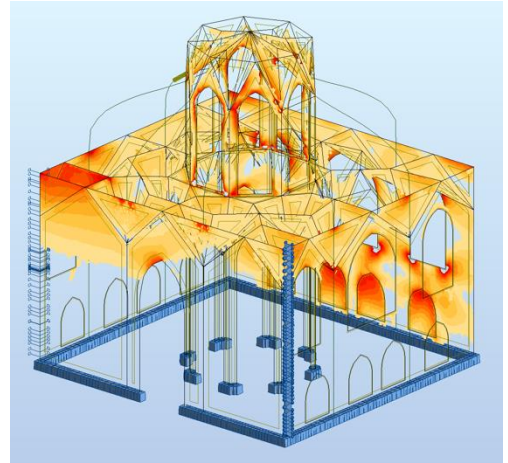
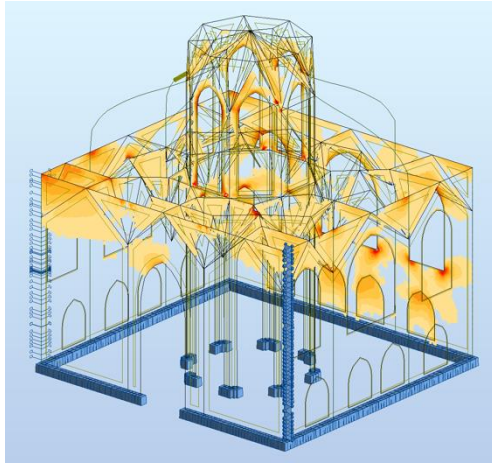
40% E



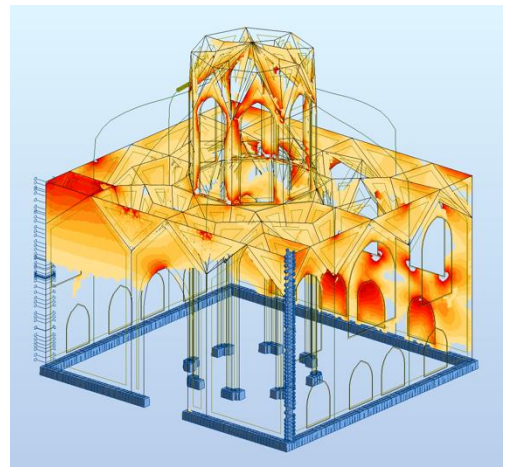
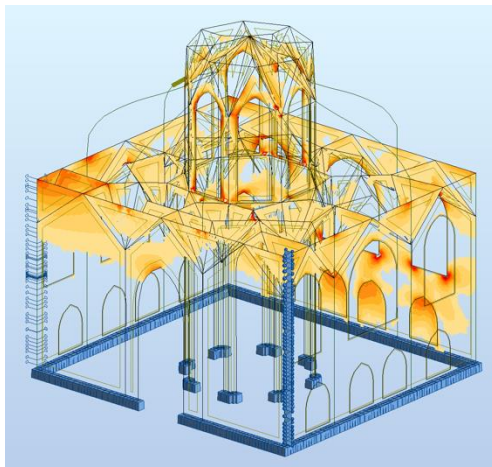
50% E



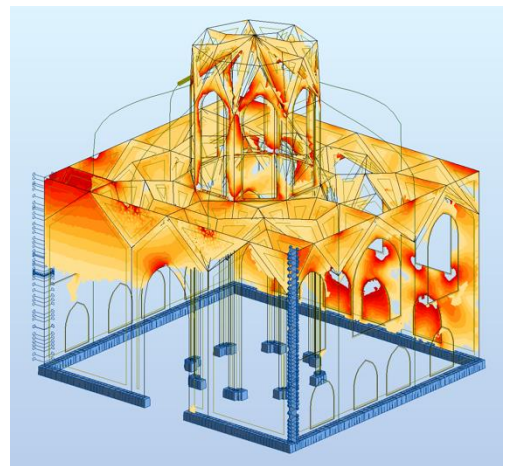
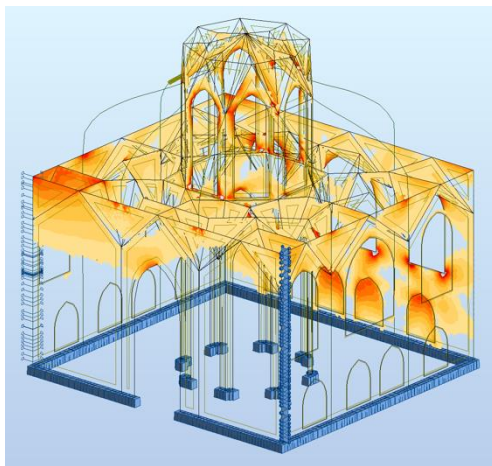
60% E



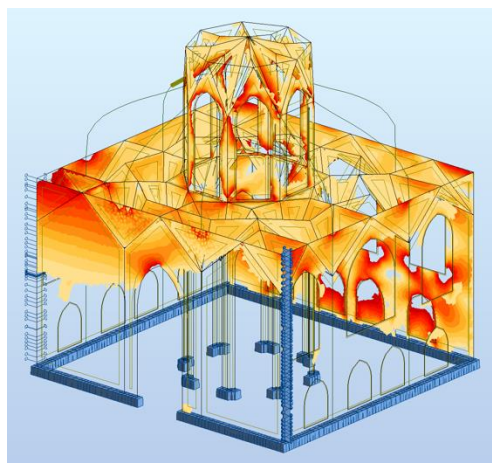
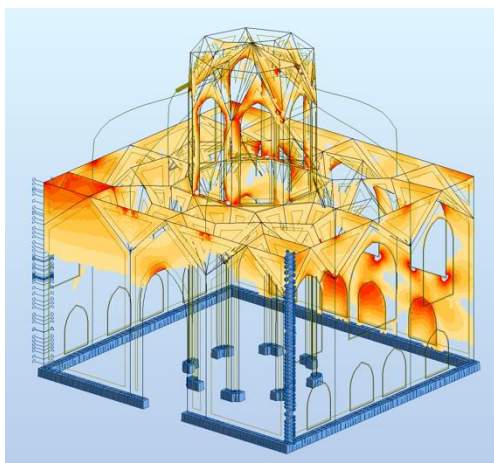
70% E



80% E



90% E



100% E

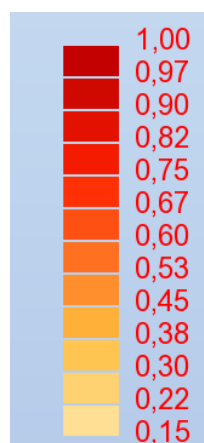
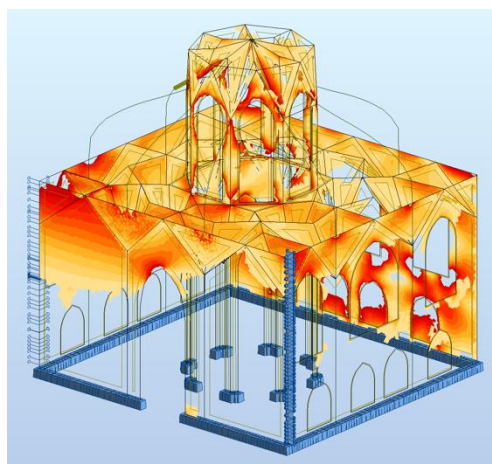
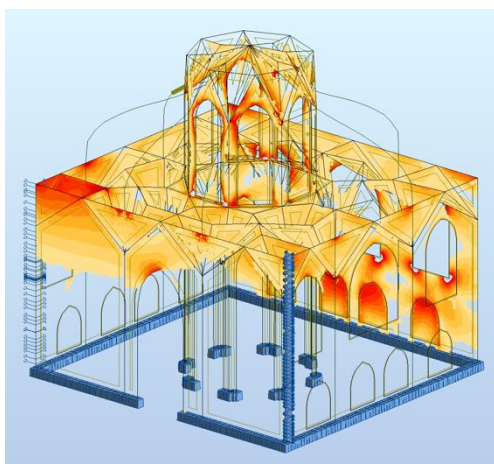


Figura 46 – Escala de Tensões

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Principais Conclusões

É reconhecido mundialmente que o património cultural edificado continua a deteriorar-se, ficando este por vezes com danos irreparáveis. Salienta-se a imensurável perda cultural que provocaria o eventual colapso de uma construção histórica, como a Capela do Fundador, do Mosteiro da Batalha.

Dos estudos e análises numéricas realizadas podem-se tirar as seguintes conclusões que a seguir se apresentam:

- O objetivo do estudo de caracterização das características dinâmicas realizado, foi essencialmente estimar a frequência do sistema estrutural para calibrar o modelo de elementos finitos, assim como, para servir de referência para estudos posteriores, e permitir assim a identificação de eventual degradação estrutural.

- Os modelos estruturais elaborados permitiram reproduzir o comportamento da Capela do Fundador, avaliar as causas dos danos observados e analisar a sua resposta face às ações regulamentares.

- Os resultados obtidos com recurso ao modelo numérico calibrado para as ações verticais permitem, do ponto de vista global, interpretar as zonas críticas da estrutura, nomeadamente em relação à concentração de tensões e do padrão de fissuração observado.

- Da análise realizada é possível verificar que um eventual sismo, mesmo de pequena intensidade, poderá ter intensificado estes danos. Salienta-se a elevada vulnerabilidade da construção como está atualmente face à ação dos sismos.

6.2. Trabalhos Futuros

Na sequência do trabalho realizado são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, tais como:

- Execução de um maior número de ensaios ao nível dos elementos, tanto estruturais como não estruturais para uma melhor caracterização das propriedades materiais;
- Execução de análises não-lineares de forma a comparar os resultados obtidos;
- Estudo de soluções de reforço e determinar o custo-eficiência de cada solução de reforço;
- Implementação de um sistema permanente de monitorização, que permita o acompanhamento dos deslocamentos estruturais;

Bibliografia

- Branco, F. A., & Azevedo, J. (1990). *Mosteiro da Batalha - Inspeção e Avaliação Estrutural*. Universidade Técnica de Lisboa, Centro de Mecânica e Engenharia Estrutural, Lisboa.
- Caetano, E. (1992). *Identificação Experimental de Parâmetros Dinâmicos em Sistemas Estruturais*. tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Caetano, E., Cunha, Á., & Magalhães, F. (Abril de 2010). Novas Perspectivas na análise do comportamento dinâmico de estruturas. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*.
- Costa, C. E. (2009). *Obras de Conservação e Restauro de Edifícios Antigos: Estudos Sobre a Conservação da Pedra do Convento de S. Francisco de Mesão Frio*. Universidade de Trás-os Montes e Alto Douro - Escola de Ciências e Tecnologia, Trás-os-Montes.
- Fernandes, J. (2014). *Avaliação das Características Dinâmicas de Estruturas Existentes*. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Aveiro.
- Gago, A. (2004). *Análise Estrutural de Arcos, Abóbadas e Cúpulas - Contributo para o Estudo do Património Construído*. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Lopes, V. (2009). *Identificação Mecânica e Avaliação do Comportamento Sísmico de Chaminés em Alvenaria*. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Lopes, V., Guedes, J., Arêde, A., Milheiro, J., Paupério, E., & Costa, A. (2010). Identificação dinâmica de estruturas. *Congresso Património 2010*. NECREP.
- Luso, E. e. (2004). *Breve história da conservação e do restauro*. Instituto Politécnico de Bragança.
- Margarido, D. (2013). *Metodologias para a Avaliação dos Níveis de Vibração em Estruturas do Ponto de Vista do Conforto Humano*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Milani, E., Milani, G., & Tralli, A. (2008). Limit analysis of masonry vaults by means of curved shell finite elements and homogenization. *International Journal of Solids and Structures*, 45 (20), pp. 5258-5288.

- Miranda, L. (2011). *Ensaaios acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Mockovciaková, A., & Pandula, B. (2003). *Study of the relation between the static and dynamic moduli of rocks*.
- Najibi, A. R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., & Asef, M. R. (12 de 2014). Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.
- Nanometrics. (2016). Titan Accelerometer - force balance triaxial. Canadá.
- National Instruments. (2014). Obtido de Módulos de entrada analógica.
- Neves, N., Costa, A., & Arêde, A. (2004). Identificação dinâmica e análise do comportamento sísmico de um quarteirão localizado na cidade da Horta - Ilha do Faial. *In 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*. Porto: Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas.
- NP-EN 1998-1 . (2010). Eurocódigo 8 - Projeto de Estruturas para resistência aos sismos. *Parte 1: Regras Gerais, ações sísmicas e regras para edifícios*.
- PCB Piezotronics. (s.d.). Obtido em 2016, de <http://www.pcb.com>
- Pedroso, M. (2016). *Monitorização das Vibrações Ambientais no Mosteiro da Batalha*. Instituto Politécnico de Leiria, Leiria.
- Pimentel, R. (2008). *Caracterização do Tráfego Ferroviário e dos seus Efeitos em Pontes de Pequeno Vão*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Pinho, M. (2016). *Caracterização de Edifícios de Betão Armado com Paredes de Alvenaria de Enchimento - Estudo Numérico e Experimental*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, FEUP, Porto.
- Rodrigues, J. (2004). *Identificação Modal Estocástica - Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil*. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Silva, J., & Redol, P. (2007). *Mosteiro da Batalha*. Batalha: SCALA.

- Szolomocki, J. (2009). Structural behaviour of masonry vaults. *18th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering*. Weimar, Germany.
- Varum, H., & Rodrigues, H. (2005). *Avaliação do Comportamento Estrutural da Torre Medieval de Vilharigues - Vouzela*. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Aveiro.
- Vazão, F. (2015). *Levantamento e caracterização das patologias da Capela do Fundador do Mosteiro de Santa Maria da Vitória*. Instituto Politécnico de Leiria, Leiria.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Esta página foi intencionalmente deixada em branco