

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil - Estruturas e Construção
pela Universidade da Beira Interior sob a orientação de:

Professor Doutor **Marcin Michal Górski** - Professor Auxiliar
Convidado do Departamento de Engenharia Civil e
Arquitectura da Universidade da Beira Interior

Resumo

O principal objectivo deste trabalho foi estudar e compreender o comportamento sísmico do Convento de Santa Maria de Aguiar, pela importância que estes tipos de edifícios constituem para o valor histórico e cultural de Portugal, sendo este um exemplo proveitoso para aplicação de metodologias de análise sísmica em edifícios sacros.

De modo a estudar o comportamento tanto estático como dinâmico da estrutura, foi necessário compreender o funcionamento dos elementos estruturais tais como os pilares, contrafortes, abóbadas e paredes, pois todos estes elementos são construídos em alvenaria estrutural. Assim houve a necessidade de estabelecer valores das características do material. De modo a perceber o seu comportamento para uma posterior adaptação ao real valor destas características, foram realizados ensaios laboratoriais sobre o material.

Para analisar o comportamento da estrutura foi realizado um modelo numérico tridimensional no programa Autodesk Robot 2010®, cuja modelação foi realizada através do método dos elementos finitos. A formulação do modelo estrutural foi definida através do levantamento das características geométricas do Convento. Como se trata de uma estrutura com uma geometria algo complexa houve a necessidade de adoptar uma metodologia mais simplificada que permita avaliar a estrutura globalmente. Assim, a estrutura foi analisada sob a acção de sismos através de uma análise linear elástica para os blocos de alvenaria, de acordo com os parâmetros estabelecidos no Eurocódigo 8 e no respectivo anexo nacional.

Os resultados obtidos foram apresentados e discutidos sob forma de tensões e deslocamentos, que foram comparados com os resultados para um estado de tensão provocado apenas pelo peso próprio da estrutura.

O conhecimento do comportamento destas estruturas sujeitas a este tipo de acções, é importante, pois assim é possível prevenir possíveis danos que estas acções podem provocar, localizar zonas problemáticas da estrutura, e proceder, assim, a um reforço ou até mesmo a uma reabilitação da estrutura.

Palavras-chave: Comportamento Sísmico, Estruturas Sacras, Modelação Numérica, Convento de Santa Maria de Aguiar

Abstract

The aim of this thesis is to understand the seismic behaviour of the Convento de Santa Maria de Aguiar (Figueira de Castelo Rodrigo, Portugal), for its historical and cultural importance in Portugal; it is a useful example of the application of seismic analysis methods in sacral buildings.

In order to study the behaviour of both static and dynamic structure, it was necessary to understand the mechanics of masonry structural elements such as columns, buttresses, domes and walls. Thus it was necessary to establish values of the characteristics of the material. Laboratory tests were performed on the material in order to understand their behaviour.

To analyse the structural behaviour, a three-dimensional numerical model in Autodesk® Robot 2010 was performed, whose modelling was conducted using the finite element method. The formulation of the structural model was defined by assessing the geometric characteristics of the Convent. As this is a structure with a rather complex geometry, it was necessary to adopt a simplified methodology to assess the overall structure. Thus, the structure was analysed under the action of earthquakes through a linear elastic analysis for the block wall, according to the parameters set out in Eurocode 8 and its national Annex.

The results were presented and discussed in the form of stresses and displacements, which were compared with results for a state of tension caused only by the self weight of structure.

Understanding the behaviour of these structures subjected to this type of action is important, as it is possible to prevent possible damage that these actions may cause, locate problem areas of the structure, reinforce the structure, or even attempt rehabilitation of the structure.

Key words: Seismic Behaviour, Sacral Buildings, Numerical Modeling, Convento de Santa Maria de Aguiar

Índice

1	Capítulo I - INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.1.1	Os sismos.....	1
1.1.2	O património arquitectónico	2
1.1.3	Conservação, protecção e restauro do património arquitectónico em zonas sísmicas	3
2	CAPÍTULO II - DESCRIÇÃO HISTÓRICA DO CONVENTO DE SANTA MARIA DE AGUIAR	6
2.1	Introdução	6
2.2	O Convento de Santa Maria de Aguiar	7
2.2.1	Localização	8
2.2.2	Características	8
2.2.3	Descrição histórica	15
2.3	Conclusões	16
3	Capítulo III - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO CONVENTO DE SANTA MARIA DE AGUIAR E DOS MATERIAS ESTRUTURAIIS	18
3.1	Introdução	18
3.2	A estrutura.....	18
3.2.1	A alvenaria estrutural	18
3.2.1.1	Os pilares	20
3.2.1.2	As abóbadas	21
3.2.1.3	Os contrafortes	21
3.2.1.4	Os Arcos	23
3.2.1.5	As paredes	24
3.3	O Material da Estrutura.....	26
3.3.1	Descrição e características dos materiais.....	26
3.4	Inspecção Geral	27
3.5	Ensaio de Caracterização Mecânica do Material Estrutural	27
3.5.1	Ensaio de Compressão Uniaxial	27
3.5.2	Módulo de elasticidade	28
3.5.3	Coeficiente de Poisson	30
3.5.4	Massa Volúmica	31
3.6	Outras características do granito	32
3.7	Conclusões	32
4	CAPÍTULO IV - MODELAÇÃO NUMÉRICA DO CONVENTO DE SANTA MARIA DE AGUIAR	34
4.1	Introdução	34
4.2	Descrição geral do convento.....	34
4.3	Caracterização geométrica da igreja	35

4.3.1	Recolha de elementos	35
4.4	Modelação da estrutura do convento	40
4.4.1	Utilização do programa Autodesk Robot Structural Analysis	40
4.4.2	Método dos elementos finitos	41
4.4.3	Análise Elástico Linear	42
4.5	Ajuste do Modelo Estrutural	43
4.6	Conclusões	48
5	CAPITULO IV - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO SÍSMICO DO CONVENTO DE SANTA MARIA DE AGUIAR.....	50
5.1	Introdução	50
5.2	Descrição do modelo estrutural.....	50
5.3	Caracterização da acção sísmica	52
5.3.1	Análise da Resposta Sísmica da Estrutura.....	53
5.3.2	Interpretação de resultados	54
5.3.2.1	Análise estática linear	54
5.3.2.2	Comportamento dinâmico da estrutura	56
5.3.2.3	Análise Sísmica Linear	62
5.4	Conclusões	66
6	Considerações Futuras	67
7	Referencias Bibliográficas.....	68

Índice de figuras

Figura 1-1 - Ruínas do Convento do Carmo após o sismo de 1755 em Lisboa.....	4
Figura 2-1 - Vista geral do Convento de Santa Maria de Aguiar.....	7
Figura 2-2 - Vista aérea do Convento de Santa Maria de Aguiar.....	8
Figura 2-3 - Vista poente do Convento de Santa Maria de Aguiar.....	9
Figura 2-4 - Vista nascente do Convento de Santa Maria de Aguiar.....	9
Figura 2-5 - Vista interior da nave central e transepto (1).....	10
Figura 2-6 - Vista interior da nave central e transepto (2).....	11
Figura 2-7 - Pormenor dos pilares.....	11
Figura 2-8 - Pormenor dos contrafortes.....	11
Figura 2-9 - Pormenor do fecho da abóbada.....	12
Figura 2-10 - Porta de acesso à sacristia.....	12
Figura 2-11 - Vista do altar-mor.....	13
Figura 2-12 - Siglas representativas das assinaturas dos trabalhadores.....	13
Figura 2-13 - Vista da sala do capítulo do Convento de Santa Maria de Aguiar.....	14
Figura 2-14 - Vista panorâmica do Convento de Santa Maria de Aguiar.....	16
Figura 3-8 - Alvenaria estrutural do Convento.....	19
Figura 3-9 - Pilar do Convento.....	20
Figura 3-10 - Abobadas	21
Figura 3-11 - Contrafortes	22
Figura 3-12 - Arco da nave lateral	23
Figura 3-6 - Fendilhação em paredes, provocada por assentamentos.....	24
Figura 3-7 - Fendilhação em paredes, provocada por forças sísmicas.....	25
Figura 3-8 - Pormenor macroscópico do granito.....	26
Figura 3-9 - Ensaio de compressão uniaxial.....	28
Figura 3-10 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade.....	29
Figura 3-11 - Provente instrumentado com extensómetros	30
Figura 3-12 - Medição da massa do provete.....	31
Figura 4-13 - Alçado Sul.....	36
Figura 4-14 - Alçado Norte.....	36
Figura 4-15 - Alçado Poente.....	37
Figura 4-4 - Alçado Nascente.....	37
Figura 4-5 - Planta do Convento.....	38

Figura 4-6 - Corte.....	38
Figura 4-7 - Concepção 3D do Convento por linhas.....	39
Figura 4-8 - Elementos finitos usualmente empregues em Análises Estruturais; (a) Elemento de Viga Tridimensional; (b) Elemento Sólido; (c) Elemento em Casca Espacial.....	42
Figura 4-9 - Esquema de simetria da planta do Convento.....	43
Figura 4-10 - Modelo em 3D por barras do Convento no software Robot	44
Figura 4-11 - Modelação por elementos de casca.....	44
Figura 4-12 - Malha dos elementos finitos para os elementos de casca.....	45
Figura 4-13 - Estrutura com apoios fixos.....	46
Figura 4-14 - Valor das características do granito da estrutura introduzidos no Robot.....	46
Figura 4-15 - Propriedades dos elementos casca da estrutura introduzidos no Robot.....	47
Figura 4-16 - Vista geral da estrutura com a malha dos elementos finitos e apoios.....	48
Figura 5-1 - Combinação sísmica.....	54
Figura 5-2 - Tensões principais devidas ao peso próprio (máx = 2,77 MPa) (Estrutura total).....	55
Figura 5-3 - Tensões principais devidas ao peso próprio (máx = 2,77 MPa) (Metade da Estrutura).....	55
Figura 5-4 - Modo de vibração 1 (f= 0,47 Hz).....	56
Figura 5-5 - Modo de vibração 2 (f=4,32 Hz)	57
Figura 5-6 - Modo de vibração 3 (f=9,68 Hz)	57
Figura 5-7 - Modo de Vibração 4 (f=10,32 Hz).....	58
Figura 5-8 - Modo de Vibração 5 (f=11,45 Hz).....	58
Figura 5-9 - Modo de vibração 6 (f=13,77 Hz)	59
Figura 5-10 - Modo de vibração 7 (f=16,21 Hz)	59
Figura 5-11 - Modo de vibração 8 (f=16,24 Hz)	60
Figura 5-12 - Modo de vibração 7 (f=16,21 Hz).....	60
Figura 5-13 - Modo de vibração 9 (f=16,83 Hz)	61
Figura 5-14 - Distribuição de tensões por toda a estrutura (1).....	62
Figura 5-15 - Distribuição de tensões por toda a estrutura (2).....	63
Figura 5-16 - Pormenor da distribuição de tensões na parede de apoio dos arcos.....	63
Figura 5-17 - Pormenor da distribuição de tensões na parede de apoio das abóbadas.....	64
Figura 5-18 - Deformada corresponde ao máximo deslocamento.....	65

Índice de quadros

Quadro 3-1 - Resultado do ensaio de compressão uniaxial.....	28
Quadro 3-2 - Resultado do ensaio da determinação da massa volúmica.....	31
Quadro 3-3 - Quadro de características do granito.....	32
Quadro 4-1 - Descrição do material e do tipo de modelação para os pilares da estrutura	47
Quadro 4-2 - Exemplo das características da malha dos elementos finitos para 5 painéis.....	48
Quadro 5-1 - Valores característicos para uma acção sísmica do tipo I, solo tipo A em zona D.....	53
Quadro 5.2 - Frequências naturais obtidas numericamente por modo de vibração.....	61

Lista de símbolos e abreviaturas

E	Módulo de elasticidade
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão
ε	Deformabilidade
ε_t	Deformação Transversal
ε_l	Deformação Longitudinal
ρ	Peso volúmico
V	Volume
T_B	Limite inferior do troço de aceleração constante
T_C	Limite superior do troço de aceleração constante
T_D	Valor que define o troço de deslocamento constante
S	Factor do solo
η	Factor de correcção do amortecimento
X	Direcção ortogonal segundo X
Y	Direcção ortogonal segundo Y
Z	Direcção ortogonal segundo Z
th	Espessura dos painéis
f	Frequência
T	Período

Âmbito da dissertação

Este trabalho surge como o findar de um ciclo de aprendizagem do Mestrado do 2º Ciclo em Engenharia Civil - Estruturas e construção da Universidade da Beira Interior.

1 Capítulo I - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

1.1.1 Os Sismos

Os sismos são entre os fenómenos naturais os mais devastadores, por isso também, aqueles que despertam mais interesse, devido ao seu efeito que provocam nas construções, na perda de vidas humanas e na economia. Durante muito tempo acreditou-se que a sua origem era sobrenatural, mas com o desenvolvimento científico e tecnológico mostrou-se que é possível perceber a sua origem, “funcionamento” e com isto minorar ao mínimo todos estes efeitos devastadores.

Sendo estes fenómenos recorrentes, ou seja, que se repetem ao longo do tempo, resultantes da libertação de energia acumulada durante esses tempos, torna-se necessário dotar as estruturas de mecanismos que possam atenuar os estragos, ou até mesmo resistir a este fenómeno.

Nos países onde a frequência de sismos destrutivos é esporádica, não se altera a prática de construção, ou então é menos duradoura, como é o caso de Portugal, onde os sismos ocorrem com um período de retorno de dois ou mais séculos, onde neste intervalo é rara a ocorrência de um sismo de magnitude significativa.

As construções que se têm mantido ao longo de séculos sem danos, ou danos reduzidos, já demonstraram a sua segurança e aceitação neste campo. No entanto, existem várias situações em que o raciocínio anterior se mostrou incorrecto, talvez devido à probabilidade de uma estrutura ser submetida a um sismo de magnitude crescente aumenta com o período da sua vida, talvez porque a capacidade de resistência da construção se reduz com o passar do tempo. As estruturas do património arquitectónico foram sendo desenvolvidas ao longo dos séculos tendo em consideração soluções e técnicas cada vez mais eficientes devido aos erros cometidos anteriormente.

Em Portugal existe um grande número de edifícios de cariz arquitectónico elevado que interessa conservar por constituírem peças de grande valor económico/social/cultural nacional e internacional. Denota-se nesta área uma falta de evolução devido ao carácter complexo que estes edifícios possuem, tanto a nível estrutural como arquitectónico. Pois nem sempre se consegue caracterizar os materiais nem o seu real comportamento, tal como desconhecer a técnica construtiva que foi adoptada na sua concepção, ou talvez devido à escassez de meios tecnológicos adequados para a caracterização de modelos.

1.1.2 O Património Arquitectónico

Património pode ser qualquer construção, tipologia arquitectónica ou espaço que, pelo seu interesse arquitectónico, histórico, cultural ou social, constitui um bem que deve ser protegido e promovido com vista à sua apropriação pela comunidade.

A ideia de património, no sentido de possuir e transmitir algo com valor, ganha propriedades culturais na antiguidade clássica. Designa hoje a totalidade dos “bens” herdados do passado, sejam eles culturais ou naturais.

A defesa e valorização do património são factores determinantes no processo de qualificação urbanística dos espaços urbanos e rurais, contribuindo para o desenvolvimento económico e cultural revelando-se um veículo privilegiado de coesão social. O património urbano tem um papel fundamental e insubstituível na produção simbólica e na imagem das diferentes formas da cidade contemporânea. Do mesmo modo o património em espaço rural a par com o meio natural assume um crescente interesse na produção de uma cultura patrimonial mais inclusiva. Assim, a salvaguarda do património é uma dimensão fundamental na definição e aplicação dos instrumentos de planeamento e de gestão urbanística.

Mesmo que a reacção ao pensamento moderno tenha conduzido a um novo olhar sobre o antigo, é fácil constatar que tal fenómeno tem facetas díspares não existindo ainda um consenso alargado entre técnicos e especialistas que intervêm na gestão e no ordenamento dos territórios sobre princípios gerais de intervenção em património.

A noção de património foi evoluindo não só na sua conceptualização, mas igualmente e sobretudo na perspectiva globalizante do termo.

Como património construído, como refere a Convenção para a Salvaguarda do Património Arquitectónico da Europa, definem-se as seguintes categorias: [UNESCO, 03]

- **Monumento:** realizações particularmente notáveis em virtude do seu interesse histórico, arqueológico, artístico, científico, social ou técnico, incluindo as instalações que delas fazem parte;

- **Grupos Arquitectónicos:** Grupos homogéneos de construções urbanas ou rurais, notáveis pelo seu interesse histórico, arqueológico, artístico, científico, social ou técnico;

- **Sítios:** Obras combinadas entre o homem e a natureza parcialmente construídas e constituindo espaços característicos e como objecto de uma limitação topográfica, notáveis pelo seu interesse histórico, arqueológico, artístico, científico, social ou técnico.

O conceito em análise, associado ao valor material, confunde-se com um sentimento de posse que se acumula e transmite de geração em geração, desempenhando o património um papel importante na formação da nossa memória colectiva.

Em Portugal, a definição dos critérios para a classificação dos bens culturais imóveis e a respectiva gestão compete ao IGESPAR- Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico. [IGESPAR, 06]

1.1.3 Conservação, Protecção e Restauro do Património Arquitectónico em Zonas Sísmicas

Há uma necessidade vigente em garantir protecção ao património arquitectónico não só em Portugal como no resto do mundo. Há no entanto associações que trabalham neste sentido, entre elas o ICOMOS (Conselho Internacional de Monumentos e Sítios). Esta associação surge em 1965 após a Carta de Veneza (1964), carta esta que não é mais que um tratado que dá um quadro internacional para a preservação de edifícios antigos, é responsável por propor os bens classificados como património cultural e estabelecer linhas gerais para a sua conservação, protecção e restauro. Sendo Portugal um país onde a actividade sísmica ocorre, como a História o comprova, nomeadamente em 1755, onde a actividade sísmica provocou danos em diversos edifícios de cariz social e cultural, sendo o mais emblemático o Convento do Carmo (Figura 1-1), devido ao valor patrimonial que estes edifícios representam para um país. Assim há então essa necessidade de protecção destes edifícios, mas devido à sua natureza e história intrínsecas (material e constituição), apresentam desafios específicos no seu diagnóstico e restauro que limitam a aplicação dos regulamentos e normas actuais sobre a construção. Assim as recomendações são não só desejáveis como, também, necessárias, de modo a estabelecer metodologias de análise racionais e métodos de intervenção apropriados ao seu contexto cultural.



Figura 1-1 - Ruínas do Convento do Carmo após o sismo de 1755 em Lisboa (fotografia: Chris Adams)

Para que a conservação, protecção e restauro deste tipo de edifícios surja de uma forma coerente com a sua morfologia há necessidade de seguir umas orientações estabelecidas previamente. A conservação e protecção do património cultural requer habitualmente uma abordagem multidisciplinar envolvendo uma variedade profissionais e de organizações. Qualquer planeamento para a conservação e protecção estrutural requer dados qualitativos, baseados na observação directa da degradação dos materiais e nos danos estruturais, na investigação histórica, bem como dados quantitativos baseados em ensaios científicos e com modelos matemáticos, semelhantes aos que são usados na engenharia moderna. [UNESCO-ICOMOS, 03]

A investigação da estrutura exige uma abordagem interdisciplinar que vai para lá da das simples considerações técnicas, pois a investigação histórica pode nos trazer conhecimento do seu comportamento estrutural, este conhecimento é atingido através dos seguintes aspectos: definição, descrição e compreensão do significado histórico e cultural do edifício; pesquisa histórica cobrindo a vida inteira da estrutura, incluindo alterações e intervenções; descrição da estrutura no seu estado actual e descrição das acções envolvidas, no comportamento estrutural e dos tipos de materiais; identificação da degradação e dos danos; identificação de efeitos do ambiente sobre o edifício. De forma a caracterizar da melhor maneira a estrutura há necessidade de pesquisas de campo e ensaios laboratoriais. O programa de ensaios deve ser baseado numa clara observação preliminar sobre quais fenómenos são mais importantes. Estes

ensaios têm habitualmente a finalidade de identificar os parâmetros mecânicos, físicos e químicos dos materiais. Um dos parâmetros mais importantes, é a avaliação da segurança.

A avaliação da segurança deve determinar quando os níveis de segurança da estrutura são ou não aceitáveis, tornando-se num factor decisivo no que respeita à protecção e posterior restauro da estrutura. Sendo esta avaliação uma tarefa difícil devido à complexidade e compreensão do próprio edifício, as incertezas respeitantes às características dos materiais, assim os modelos matemáticos podem ajudar em muito numa análise deste género, no entanto não convém que seja o único método de análise estrutural.

Existem assim diversas técnicas de restauro ou prevenção que podem ser usadas para salvaguarda a integridade deste património, entre as quais o reforço das zonas críticas por meio da aplicação de materiais compósitos, FRP, carbono..., injeção de argamassas nas alvenarias estruturais, escoramento, protecção e isolamento contra agentes biológicos nos materiais estruturais.

2 CAPÍTULO II - DESCRIÇÃO HISTÓRICA DO CONVENTO DE SANTA MARIA DE AGUIAR

2.1 Introdução

Notícias de 1162 e 1165 referem-se ao mosteiro, mas não se conhece a data sua fundação - é certamente um dos mais antigos da Ordem de Cister em Portugal. Da sua história constam várias doações de reis leoneses, a quem pertenceram estas terras e também de abastados portugueses. [Júlio Borges, 97]

Tempos de guerras e explorações de comendatários conduziram, muitas vezes, o mosteiro a situações deploráveis. Mas, no século XVII viria um período de renascimento que permitiu obras de vulto, como a de um belo retábulo totalmente restaurado.

Frei Bernardo de Brito, teólogo e famoso cronista do Reino e da Ordem, aqui viveu, trabalhou e seria sepultado (1617), sendo os seus restos mortais trasladados para o Mosteiro de Alcobaça.

Grandes devastações e roubos praticados pelos franceses de Massena, durante a 3ª. Invasão francesa, iniciaram a destruição do convento e depois continuada pela revolução liberal, culminando com a venda em hasta pública.

Em 1937 seria restaurada e salva de ruínas a Igreja pelos Monumentos Nacionais.

Bernardo de Claraval, nascido numa família nobre de Borgonha, grande propagador da Ordem de Cister, explicara as suas ideias sobre arquitectura monástica. Visava a renúncia à sumptuosidade e ao excessivo luxo, de certas abadias românicas. Catedrais e igrejas deviam recorrer aos ornatos materiais para incitar à devoção.

A Igreja do Convento de Santa Maria de Aguiar é uma dessas ideias de S. Bernardo para a arte de edificar - uma austera arquitectura do gótico inicial das construções cistercienses, nos seus primeiros tempos. [Maria Paula Albuquerque, 96]



Figura 2-1 - Vista geral do Convento de Santa Maria de Aguiar

2.2 O Convento de Santa Maria de Aguiar

“É o edifício do Mosteiro de Santa Maria de Aguiar (Figura 2-1) bastante nobre para aquele tempo antigo, e assim a Igreja como o claustro, dormitório e mais oficinas não deixam de ter suficiente grandeza: com a desgraça, porém, de nunca se ter aumentado muito por causa do seu mesmo sítio, que tendo pouco de saudável tem também a pensão de estar no tempo das guerras exposto à invasão dos inimigos, por ficar na raia do reino.”

Memórias tiradas do cartório do real Mosteiro de Santa Maria de Aguiar, da Ordem de S. Bernardo, sito em Ribacôa, junto à vila de Castelo Rodrigo, nos confins da Beira Alta e limites do Bispado novo de Lamego e Comarca de Pinhel. [Frei Manuel da Rocha 1676-1744]

2.2.1 Localização

O Convento de Santa Maria de Aguiar fica situado a 3 km de Figueira de Castelo Rodrigo, à beira da estrada que liga a vila e sede à freguesia de Almofala, distrito da Guarda. A sua fundação assentou em razões essencialmente de cariz religioso proveniente da amizade e veneração com que D. Fernando (rei leonês) tinha para com S. Bernardo de Claraval e a toda a sua religião, a quem o mesmo fez doação de terras que pertenceram aos bens do Mosteiro e resultante do plano encetado pelos reis de Leão no sentido de enfortalecerem e povoarem a região, que na época se encontrava na posse do reino leonês, situada numa zona sujeita a frequentes incursões muçulmanas.

O seu nome é derivado da veneração mariana no mosteiro, onde se encontrava uma imagem de Nossa Senhora, “com fama de milagrosa e que atraía muitos visitantes, tanto de Portugal como de Castela.” [Fr. Francisco Brandão- Monarquia Lusitana ,Parte V,1650]



Figura 2-2 - Vista aérea do Convento de Santa Maria de Aguiar

2.2.2 Características

Sofrendo várias modificações ao longo dos séculos, o convento, construído à semelhança da abadia mãe de Cister ou Fontenay, é composto pela **Igreja**; **Casa Conventual**, de que ainda restam a Sacristia e a Sala do Capítulo; e a **Hospedaria** (Figura 2-2).

A Igreja, ampla e alta, apresenta uma construção austera, ao gosto dos cistercienses, com a orientação Este-Oeste.

A frontaria não é mais que muros lisos, o do meio de maior elevação que os laterais, divididos por dois gigantes; no central abrem-se a porta de duplo arco quebrado, sem ornamentação, e uma fresta alta para iluminação do coro.



Figura 2-3 - Vista Poente do Convento de Santa Maria de Aguiar

Do lado sul é algo mais rica a fachada do transepto, encimada por discreto pináculo, graças à grande janela geminada e à porta, ambas de três arquivoltas quebradas e reentrantes, e ainda ao reforço dos cunhais com gigantes duplos, um para cada face - as cornijas das paredes laterais assentam em modilhões esculpidos. Rigorosa simplicidade domina os volumes da abside e das absidiolas, quadrangulares; uma inesperada torre cilíndrica encerra a escada de acesso à modesta sineira.



Figura 2-4 - Vista Nascente do Convento de Santa Maria de Aguiar

Ficaram por levantar dois tramos das três naves, previstos no projecto inicial, de onde resulta um espaço interior muito pouco vulgar, pois a largura e a altura pedem mais comprimento. Contudo, a pureza das linhas, a sobriedade dos volumes ornados de austeras e escassas molduras, a limitada e bem distribuída iluminação natural, conferem ao interior um ambiente espiritual de grande beleza.

Enquanto a nave central está coberta por tecto de madeira de caibros descobertos, em duas águas, as laterais possuem abóbadas de cruzaria simples, sem decoração. Vencem os dois tramos das naves arcos quebrados arrancando de pilastras ressaltadas de robustos pilares. Nave central e transepto elevam-se à mesma altura; uma abóbada de berço em arco quebrado cobre o longo transepto (Figura 2-5).



Figura 2-5 - Vista interior da nave central e transepto (1)

Pouco vulgar no nosso gótico, a ampla capela-mor ergue-se em planta quadrada; iluminada por três frestas, guarda a imagem de Santa Maria de Aguiar. As pequenas absidiolas são também abobadadas e de planta quadrada.

No primeiro tramo das naves conserva-se do antigo coro o belo arco abatido que o apoiava. Uma granítica abóbada de volta plena e muito siglada cobre a sacristia.



Figura 2-6 - Vista interior da nave central e transepto (2)

Ainda relativamente à Igreja, podemos considerar na sua arquitectura quatro etapas distintas que se foram diferenciando ao longo dos anos que a obra demorou a ser edificada.

O **estilo românico**, mais antigo e correspondendo à primeira fase da construção está caracterizado pela grossura dos pilares; a existência de contrafortes exteriores; as pequenas aberturas, em forma de frestas, que tornavam os templos mais escuros; a cobertura em abóbada de berço (semicilíndrica); os arcos de volta perfeita; e a existência do trama.

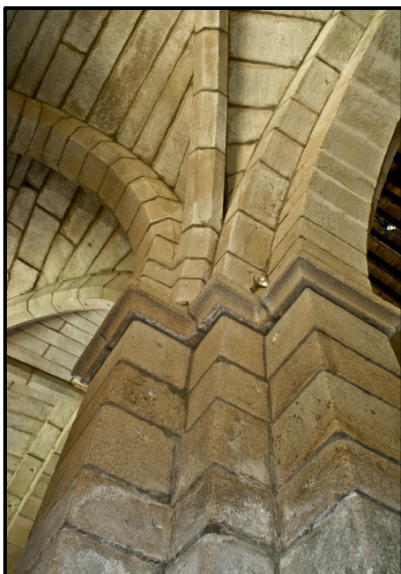


Figura 2-7 - Pormenor dos pilares



Figura 2-8 - Pormenor dos contrafortes

O **estilo gótico** nota-se pelas abóbadas em ogivas cruzadas; as colunas altas e os capitéis decorados com motivos vegetalistas; a existência do transepto ou nave transversal, que confere ao templo a forma de uma cruz latina; as nervuras que sustentam o peso da abóbada e se juntam no seu ponto central (chave da abóbada); o altar-mor virado para nascente e os lados do transepto orientados para norte e sul; a divisão em três naves, sendo a central mais elevada que as laterais.

Este estilo, de fase posterior, é contemporâneo da época dos acabamentos.



Figura 2-9 - Pormenor do fecho da abóbada

O **estilo manuelino**, uma variedade portuguesa do gótico, em que são utilizados motivos vegetais ou animais, alguns deles de inspiração dos descobrimentos, está representado na porta de acesso à sacristia.



Figura 2-10 - Porta de acesso à sacristia

O **estilo barroco** está presente a partir do século XVII, com a instauração do altar-mor, de rica e elaborada talha dourada e dos altares laterais.



Figura 2-11 - Vista do altar-mor

De referir, ainda, que por todas as paredes interiores do mosteiro notamos sinais gráficos gravados na pedra, designados por siglas, usados como assinaturas pelo dono ou construtor de uma obra. Os monges canteiros, ou os assalariados por ele contratados, usavam estas marcas para registarem o trabalho de cada um, assinalando, desta maneira, a sua habilidade.



Figura 2-12 - Siglas representativas das assinaturas dos trabalhadores

É visível, o mesmo tipo de siglas, nos diferentes componentes arquitectónicos do templo, o que nos leva a concluir que os trabalhadores eram polivalentes.

Grande parte da Casa Conventual, destinada a apoio e alojamento dos monges foi-se arruinando ou modificando para serviços quinteiros.

Tida como notável obra arquitectónica, o claustro foi totalmente arrasado no século XIX. Abria para ele a sala do capítulo, ainda existente, não atingindo os 40 m². A sua construção, talvez posterior à da Igreja, revela já um distinto estilo; é coberta por abóbada de robustas nervuras de duplo toro arrancadas de estribos adossados aos muros e apoiados em duas colunas que dividem a maior extensão da sala e ostentam capitéis de ornatos vegetalistas e bases octogonais simplesmente moldurados.



Figura 2-13 - Vista da sala do capítulo do Convento de Santa Maria de Aguiar

Hoje residência particular, a antiga hospedaria do mosteiro estende-se ao longo do adro, terminando, no lado poente, numa aprazível e bela varanda de alpendre, suportado por coluna dórica.

Ainda outra memória monástica é o chamado “cruzeiro das eiras“, ornamento setecentista encimado por uma cruz sobre larga base ondeada entre dois pináculos piramidais e cornija saliente; no meio do pano de cantaria insere-se um brasão abacial.

Edificado numa região que pertencia ao reino de Leão, a construção do Mosteiro de Santa Maria de Aguiar seguiu a influência dos monges de Moreruela (Zamora). Contudo, a sua situação junto à fronteira entre dois reinos rivais foi a causadora do tardio acabamento da edificação, adiada por causa das guerras travadas entre Castela e Portugal.

2.2.3 Descrição Histórica

Não há referência de documentos que nos permitam determinar uma data precisa da chegada dos monges à região. Santa Maria de Aguiar era um mosteiro beneditino até à altura em que o rei de Leão anexou a zona na batalha de Badajoz em 1169, substituindo, posteriormente, os monges beneditinos pelos cistercienses. Aguiar veio pertencer a Portugal definitivamente pelo tratado de Alcanizes em 1297. [Julio Borges, 97]

Por volta dos meados do século XII, doze frades, incluindo um abade, dirigem-se à região de Riba-Coa, secularmente conhecida como religiosa. Encontraram a Torre de Aguiar ou das Águias, onde se instalaram, já que documentos apelidam o mosteiro de Turris Aquilaris.

Uma tão fértil região foi naturalmente cobiçada por portugueses e leoneses. Alimentada por vários rios, rica em água, com poderes medicinais, produzia em abundância trigo, azeite, amêndoa, centeio e lacticínios. Era, ainda rica em caça miúda. Sofreu, por estas razões, as vicissitudes da guerra, já que se encontrava em zona fronteiriça. Assim, Santa Maria de Aguiar surge numa importante região de tradição cristã e economicamente estratégica.

O facto de o mosteiro de Aguiar ter sido o único de fundação régia, durante o reinado de D. Fernando I, de Leão, e de ter ficado sujeito à diocese de Ciudad de Rodrigo, mostra o interesse com que se encarava a posse das terras de Riba-Coa.

As doações e privilégios que foram concedidos ao mosteiro permitiram o seu enriquecimento patrimonial.

O projecto inicialmente adoptado, na sua construção, previa um interior amplo, organizado em três naves, mas tal só aconteceu nos primeiros dois tramos. Provavelmente pelos repetidos saques que a região sofria e diminuição de verbas, o plano arquitectónico foi drasticamente reduzido, embora se tenham mantido as dominantes essenciais de cunho cisterciense: linhas austeras e rígidas, ausência de decoração, sobriedade generalizada. Ainda assim, a qualidade e ambição do projecto inicial documenta-se em alguns aspectos construtivos, como a elevação à mesma altura da nave central e do transepto.

O período das invasões francesas e a extinção das ordens religiosas determinou o estado de abandono a que o mosteiro chegou na segunda metade do século XIX e inícios do século XX.

Ao longo dos séculos, o Convento de Santa Maria de Aguiar teve várias designações:

Mosteiro de Turris Aquilaris

Mosteiro da Torre das Águias

Mosteiro da Torre de Aguiar

Mosteiro de Sancta Maria de Turris Aquilaris

Mosteiro de Santa Maria da Torre de Aguiar

Mosteiro de Santa Maria de Aquilis

Mosteiro de Santa Maria de Aguiar

Real Mosteiro de Santa Maria de Aguiar

Convento da Torre de Aguiar

Convento de Santa Maria de Aguiar



Figura 2-14 - Vista panorâmica do Convento de Santa Maria de Aguiar

2.3 Conclusões

O Convento de Santa Maria de Aguiar, surge no século XII, em posição de destaque na região de Riba Côa, no local que os antigos chamavam Torre de Aguiar (Turris Aquilaris), impulsionado pela forte componente religiosa dos reis de Leão e como forma de enfortalecerem e povoarem a região que era frequentemente assolada por invasões muçulmanas.

É uma obra beneditina, mais tarde continuada pelos monges de Cister.

É constituído pela Igreja, Casa Conventual e Hospedaria.

A Igreja obedece a uma austera arquitectura gótica inicial das construções cistercienses, embora se possam identificar ainda os estilos românico, manuelino e barroco, diferenciados ao longo dos períodos que demorou a sua construção.

O projecto inicial foi drasticamente reduzido, embora se tenham mantido as dominantes essenciais de cariz cisterciense.

As invasões francesas e posteriormente as lutas liberais levaram o mosteiro ao mais completo abandono que culminou com a sua venda em hasta pública.

Sé nos meados do século passado aconteceram as primeiras obras de restauro e posteriormente, após a década de 90, começou a existir um esforço concertado para a revitalização do imóvel pela intervenção do IPPAR, na sua política patrimonial de salvaguarda, recuperação e valorização do Património Cisterciense.

3 Capítulo III - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO CONVENTO DE SANTA MARIA DE AGUIAR E DOS MATERIAS ESTRUTURAIS

3.1 Introdução

É fundamental conhecer a estrutura e seus materiais constituintes, nomeadamente as suas características físicas, mecânicas e até mesmo químicas, e conhecer detalhadamente os sistemas estruturais, para se poder proceder a uma avaliação do comportamento estrutural do edifício, a nível estático e dinâmico mais rigoroso.

Sendo este um edifício de carácter histórico é mais acentuada a preocupação da caracterização dos materiais, pois estes edílicos foram construídos de acordo com procedimentos e técnicas que muitas vezes não estão documentadas. Por vezes é necessário recorrer a ensaios para caracterizar o material estrutural constituinte.

A nível estrutural, o Convento é caracterizado por ser de alvenaria estrutural, ou seja, a parte estrutural do edifício é constituído por unidades de alvenaria juntos que podem ser ou não ligadas por um ligante de argamassa.

Na análise das características dos materiais constituintes do convento foram realizadas ensaios laboratoriais de modo a perceber melhor o comportamento do material, nomeadamente o ensaio de compressão uniaxial, módulo de elasticidade, coeficiente de poisson e massa volúmica

3.2 A Estrutura

3.2.1 A Alvenaria Estrutural

A alvenaria estrutural surge por volta dos anos 9000 a 7000 a.c. com as primeiras civilizações, sendo que é nesta altura que a história da arquitectura começa, e ao mesmo tempo a alvenaria surge como uma técnica de construção. Os materiais utilizados neste género de sistema eram essencialmente a pedra natural, o gesso, o tijolo e nas juntas os ligantes eram a cal, o barro, o

betume e o gesso. Esta técnica depressa foi ameaçada quando se iniciou a produção de vigas e pilares em ferro fundido, mais tarde, por volta do séc XX a alvenaria tornar-se-ia um sistema construtivo em desuso por completo com a introdução de regulamentos na Alemanha, França e Reino Unido, para estruturas de betão armado, devido à durabilidade, resistência e ao aspecto económico.

A alvenaria estrutural do Convento de Santa Maria de Aguiar consiste numa combinação de pedra natural de granito ligadas entre si com um ligante de forma a constituir um elemento heterogéneo com uma coesão eficaz que proporciona uma redistribuição dos esforços eficaz. A forma como a pedra é colocada e da própria qualidade desta pode alterar obviamente as propriedades mecânicas, propriedades químicas bem como as propriedades estruturais, por isto torna-se complicado atribuir valores para as propriedades mecânicas dos materiais constituintes neste tipo de estruturas antigas, daí ser aconselhável a realização de ensaios de cariz mecânico quer irão caracterizar o material estrutural. Como neste tipo de construções a resistência à tracção da alvenaria é muito baixa comparativamente com os valores de resistência à compressão, dependendo claramente da aderência entre os blocos de pedra e o ligante.



Figura 3-1 - Alvenaria Estrutural do Convento

3.2.1.1 Os Pilares

Os pilares têm a função de suportar o edifício e são de todos os elementos estruturais os mais simples, apenas têm carga axial de compressão à qual a alvenaria tem grande capacidade resistente. A capacidade de carga de um pilar depende do material que o constitui e da forma como este está construído, a modo como os blocos de pedra estão colocados e emparelhados uns com os outros. Os pilares possuem irregularidades geométricas que devido à elevada concentração de cargas nele aplicado podem dar origem a flexões provocadas pelo aparecimento de excentricidades. Também a perda da verticalidade dos mesmos pode provocar esforços de flexão. Por vezes estes tipos de estruturas antigas são constituídos por um núcleo interior de material mais frágil que o envolve, assim a retracção deste material, sendo que qualquer perda da secção periférica é relevante pois estas secções suportam tensões elevadas, pode provocar fendilhação que se propagará essencialmente na vertical.



Figura 3-2 - Pilar do Convento

3.2.1.2 As Abóbadas

As abóbadas nervuradas representam um sistema duplo de cobertura de uma estrutura gótica. Este tipo de abóbada foi desenvolvida para arquitectonicamente conferir ao convento uma maior iluminação e estruturalmente de modo a ter menos peso próprio e assim diminuir as reacções nos apoios, e conseqüentemente o impulso horizontal sobre estes. Este tipo de abóbada surge da intersecção em ângulo recto de duas abóbadas de berço, onde as suas diagonais resultam numa aresta designada fecho da abóbada. Assim o nível de tensões da casca da abóbada é mantido baixo e constante, visto que as nervuras (diagonais) asseguram a transmissão dos esforços até ao pilar, formando assim uma unidade estrutural rígida. A baixa espessura era racionalizada de acordo com o incremento da aplicação do material de enchimento no arranque dos arcos da abóbada, sendo a sua função principal permitir realizar o trajecto dos esforços que são transmitidos até ao pilar. Em abóbadas nervuradas constituídas por cascas contínuas as tensões de compressão são baixas, no entanto as tensões a nível das intersecções destas são elevadas. A função principal da nervura é diminuir o nível de tensões a nível da casca. Assim quando estas estão colocadas em zonas de arestas descontínuas têm uma função estrutural, caso contrário serão apenas decorativas ou construtivas. Regra geral estas abóbadas são analisadas de acordo com o seu peso próprio (carga concentrada e uniformemente distribuída), as forças horizontais não são transmitidas às abóbadas, mas sim à cobertura e posteriormente aos pilares ou paredes onde esta assenta. Numa situação de acção sísmica as abóbadas desempenham então um papel diferente, tendo estas uma função resistente onde nelas actuam cargas assimétricas, numa acção deste tipo a abóbada pode ruir por completo, parcialmente ou até ficar intacta, dependendo da estabilidade dos apoios que a suportam. [Upjohn, 73]



Figura 3-3 - Abóbadas

3.2.1.3 Os Contrafortes

Os contrafortes têm um papel importante na estrutura, pois são eles que “aguentam” os impulsos perpendiculares nas paredes, impulsos estes provenientes da acção das abóbadas e arcos. A resistência destes tem em conta o peso próprio das paredes que irá equilibrar o momento de derrube gerado pelo impulso horizontal. Assim os contrafortes surgem com o objectivo de aumentar a resistência aos momentos derrubadores sem haver necessidade de aumentar a espessura das paredes, estes impulsos horizontais são assim transmitidos para o solo não havendo assim esforços de tracção na parede de alvenaria. O contraforte deve estar assente num terreno não deformável, pois pode sofrer de assentamentos ou deformar por acção do seu elevado peso próprio, podendo arrastar consigo toda a alvenaria ao qual está ligado. Assim o contraforte tem também a função de rigidificar as abóbadas aos impulsos sísmicos.



Figura 3-4 - Contrafortes

3.2.1.4 Os Arcos

Os arcos foram um importante avanço na alvenaria estrutural, pois assim conseguia-se vencer vãos que de outra forma não era possível, pois as cargas eram transmitidas essencialmente aos apoios mediante forças de compressão, esforços que a alvenaria resiste facilmente. Estes esforços são relativamente pequenos, a geometria do arco é concebida para que estes esforços sejam transmitidos ao longo do seu eixo até aos apoios. Assim a geometria dos arcos torna-se importante devido a minimizar as excentricidades de modo a minimizar a componente horizontal sobre os apoios. Os arcos ao transmitirem estes impulsos horizontais têm tendência a derruba-los, daí no caso em estudo no alinhamento de cada arco se encontrar um contraforte que impede este derrubamento. Os arcos em estudo são arcos de geometria ogival, estes arcos reduzem os impulsos horizontais em contraponto com os restantes tipos de arcos (Circulares, Rebaixado e em Platibanda).



Figura 3-5 - Arco da nave lateral

3.2.1.5 As Paredes

As paredes assim como os pilares, neste tipo de construções em alvenaria estrutural, têm a função estrutural de resistir ao próprio peso dos tectos e das coberturas, bem como receber os impulsos normais ao plano da própria parede, impulsos estes que produzem flexões na direcção de menor inércia da parede e resistir também aos esforços horizontais devido às forças transmitidas pela cobertura quando a parede está concebida para trabalhar como contraforte. Outros esforços adicionais são também os esforços de flexão que provocam o efeito de corte nas paredes, estes efeitos podem sugerir devido à acção sísmica.

Numa estrutura romana, as paredes devem ser de tal forma que o seu centro de gravidade da secção transversal da parede não se localize fora do seu perímetro, não sendo estas demasiado esbeltas, de modo a não terem inclinações acidentais. Existindo assim uma relação típica de altura espessura que não deverá ser superior a seis [Meli, 1998], assim quando for superior a este valor deverão ser colocados elementos que confirmam uma rigidez adicional como por exemplo a adição de contrafortes.

Quando as cargas provenientes do tecto são aproximadamente iguais dos dois lados das paredes interiores estas suportam a carga aproximadamente axial, no entanto nas paredes exteriores isso já não acontece aparecendo esforços de flexão, podendo estas não garantir a estabilidade das abóbadas e surgir fendilhação.

A acção sísmica é essencialmente resistida pelas paredes e o tipo de forças actuantes dependerão do funcionamento estrutural do conjunto, as forças laterais do plano da parede provocam tensões na direcção normal a uma direcção diagonal, como a alvenaria não resiste a esforços de tracção o aparecimento de fendas ocorre perpendicularmente à direcção destes esforços de tracção. (Figura 3-6 e 3-7).

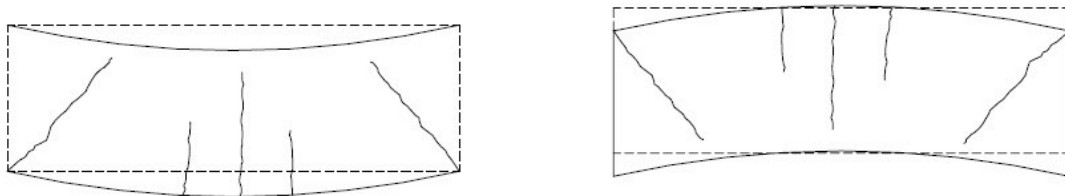


Figura 3-6 - Fendilhação em paredes, provocada por assentamentos [Sara Mourão, 01]



Figura 3-7 - Fendilhação em paredes, provocada por forças sísmicas [Sara Mourão, 01]

É frequente nas paredes estruturais o assentamento do material, deformações provocadas por factores ambientais, vibrações no local que poderão originar fissuração ao longo da parede que poderão alongar-se até às já existentes, onde se poderão acumular detritos que impedirão que estas se tornem a fechar, tornando-se isto num ciclo vicioso prejudicial para o correcto funcionamento estrutural das paredes. Outro factor de patologia estrutural pode ser causado pelo ciclo gelo/degelo, ou seja, o congelamento da água nas fendas faz com que esta aumente o seu volume e expande provocando assim tensões adicionais na alvenaria.

3.3 O Material da Estrutura

3.3.1 Descrição e Características dos Materiais

Todos os elementos estruturais (paredes, arcos, abóbadas, pilares e contrafortes) são constituídos por alvenaria estrutural de granito.

O granito é uma rocha ígnea de grão fino, médio ou grosseiro, composta essencialmente por quartzo e feldspatos, tendo como minerais característicos frequentes moscovite, biotite e/ou anfíbolas.

A composição mineralógica dos granitos é definida por associações muito variadas de quartzo, feldspato, micas (biotite e/ou moscovite), anfíbolas (sobretudo hornblenda), piroxenas (augite e hiperstena) e olivina. Alguns desses constituintes podem estar ausentes em determinadas associações mineralógicas, anotando-se diversos outros minerais acessórios em proporções bem mais reduzidas. Quartzo, feldspatos, micas e anfíbolas são os minerais dominantes nas rochas graníticas e afins.

Macroscopicamente, o quartzo é reconhecido como mineral incolor, geralmente translúcido, muito comum nos granitos.

Os feldspatos (microclina, ortóclase e plagióclases), são os principais condicionantes do padrão cromático das rochas silicáticas.

Este granito, denominado granito amarelado, apresenta macroscopicamente um granulado médio ou médio a grosseiro e leve tendência porfiróide, de duas micas, com ligeira alteração e foliação incipiente. Este granito estrutural trata-se de um granitóide tardi a pós-tectónico relativamente à 3ª fase de deformação hercínica. [Anuário das Rochas, 97]



Figura 3-8 - Pormenor macroscópico do granito

3.4 Inspeção Geral

Foram realizadas inspeções visuais ao convento de modo a caracterizar melhor o sistema estrutural, os materiais estruturais, possíveis anomalias e concluir assim o estado geral da estrutura, nomeadamente a nível de assentamentos, abatimentos dos arcos, deslocamentos visíveis de peças estruturais, fendas, e identificar os tipos de paredes que constituem o convento.

Apurou-se portanto que a estrutura do convento é toda ela em alvenaria estrutural de pedra natural granítica, e que esta se encontra em visivelmente bom estado de conservação, sem aparentes preocupações a nível estrutural de maior relevo.

3.5 Ensaios de Caracterização Mecânica do Material Estrutural

Com o intuito de obter uma maior e mais viável caracterização das propriedades mecânicas dos elementos estruturais procedeu-se à realização de ensaios laboratoriais sobre material recolhido no local. Os ensaios de caracterização mecânica realizados foram, o ensaio de compressão uniaxial, o ensaio de caracterização do módulo de Elasticidade, coeficiente de poisson e determinação da massa volúmica. Nos itens seguintes são descritos esses ensaios, tais como os resultados obtidos. As características do material constituinte da estrutura poderiam ser mais completas recorrendo a ensaios *In Situ* ou ensaios destrutivos, mas sendo estes ensaios que requerem uma logística maior e que poderão comprometer a integridade da estrutura ou estética do edifício, e por essas razões não foram realizados.

3.5.1 Ensaio de Compressão Uniaxial

Neste ensaio é pretendido avaliar a resistência máxima à compressão da pedra granito sem junta de ligação, através da medição da força axial que provoca a rotura desta, este ensaio foi realizado na prensa mecânica disponível no laboratório do DECA (Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura).

Foi realizado o ensaio de compressão uniaxial para um provete, designado de C1. Este provete foi submetido a forças verticais uniformemente distribuídas na base e no topo, de um modo crescente até atingir a rotura do material, Figura 3-9, no quadro abaixo é indicado o resultado da tensão de rotura, bem como as características geométricas do provete.

Quadro 3-1 - Resultado do ensaio de compressão uniaxial

Provete	Dimensões [m]	Força máxima [kN]	Tensão de rotura [MPa]
C1	0,10x0,10x0,20	1115	111,5



Figura 3-9 - Ensaio de compressão uniaxial

este ensaio estimou-se um valor de tensão de rotura bastante mais elevado que o que se encontra na realidade na estrutura, pois este ensaio foi realizado com um provete simples sem junta argamassada, no entanto foi adoptado um valor de tensão de rotura 55 MPa, pois é o valor adoptada em maior parte das construções antigas deste tipo com alvenaria estrutural de pedra em Portugal. [Graça Vasconcelos, Paulo Lourenço, 04]. Assim o ensaio serviu para estabelecer uma relação entre o valor da tensão de rotura de uma pedra simples e o valor de tensão da pedra com junta de ligação, percebendo então o decréscimo no valor da tensão provocado pela existência das juntas de ligação

3.5.2 Módulo de Elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade, foi ensaiado um provete à compressão previamente preparado com dois extensómetros longitudinais e um transversal. À medida que o provete ia sendo sujeito a uma carga axial até sensivelmente metade da força de rotura, as extensões e o próprio valor da força de compressão iam sendo registados através de um Data

Logger, sendo que o valor da compressão axial era emitido através de uma célula de carga e as extensões (deformações) através dos extensómetros referidos.

Assim e com estes valores registados procedeu-se a determinação do módulo de elasticidade de acordo com a *Lei de Hooke*, lei esta que nos traduz o comportamento linear do material, ou seja a tensão (σ) aplicada é proporcional à deformação (ϵ), existindo assim uma constante de proporcionalidade entre estas duas grandezas, o módulo de elasticidade (E). Assim:

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (1)$$

Onde:

σ = Tensão em Pascal

ϵ = Deformação (adimensional)

E = Módulo de elasticidade



Figura 3-10 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade

De salientar que este ensaio não representa o real valor do módulo de elasticidade do material que se encontra na estrutura, pois apenas caracteriza um provete de granito sem junta de ligação. Sendo que o módulo de elasticidade que se apurou foi de 40 Gpa, no entanto o módulo de elasticidade para um elemento estrutural de cantaria de granito com estas características e com juntas argamassadas, num edifício sacro, é de 15 GPa [Paulo B. Lourenço, Luis Ramos, 99].

3.5.3 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson foi determinado com base nas medições das extensões longitudinais e transversais obtidas através do ensaio do Módulo de Elasticidade, extensões estas que foram lidas e registadas através de um Data Logger. Sendo o coeficiente de Poisson a razão entre estas duas extensões. Assim:

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (2)$$

Onde:

ν = Coeficiente de Poisson

ε_t = Deformação Transversal

ε_l = Deformação Longitudinal

Deste ensaio determinou-se um coeficiente de Poisson de 0,21, valor este obtido através da relação da média das extensões transversais e extensões longitudinais. Os resultados obtidos encontram-se dentro dos valores geralmente usados para blocos de pedra, onde normalmente é adoptado 0,2. [Celeste, 00].

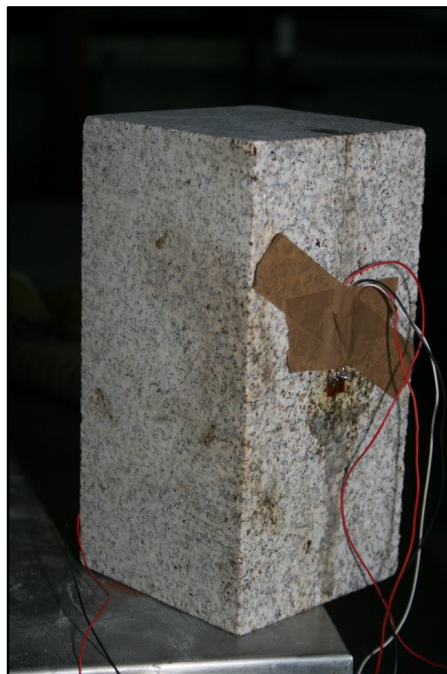


Figura 3-11 - Provete instrumentado com extensómetros

3.5.4 Massa Volúmica

A massa volúmica ou densidade foi determinada através do peso do provete de granito e do seu volume. Assim:

$$\rho = \frac{kN}{V} \quad (3)$$

Onde:

kN = Peso em quiloNewtons do provete

V = Volume em metros cúbicos do provete

ρ = Peso volúmico em quilonewtons por metro cúbico

Quadro 3-2 - Resultado do ensaio da determinação da massa volúmica

Dimensões [m]	Volume [m ³]	Peso [kg]	Peso [kN]	Peso Volúmico [kN/m ³]
0,10x0,10x0,20	0,002	4,89	0,0480	24,01



Figura 3-12 - Medição da massa do provete

3.6 Outras Características do Granito

O seguinte quadro apresenta outras características do granito que não foram necessárias determinar no âmbito desta tese, pois não se tornaram relevantes para a análise em causa.

Quadro 3-3 - Quadro de características do granito

Absorção de água à P.At. N	0,4 %
Porosidade aberta	0,9 %
Coefficiente de dilatação linear térmica	8,2 x 10 ⁻⁶ per °C
Resistência ao choque	0,1 mm
Altura mínima de queda	60 Cm

Fonte: granitos Brás e Ferreira [<http://www.brasferreira.com/>]

3.7 Conclusões

Neste capítulo foi abordado o sistema estrutural e ensaios experimentais de caracterização das propriedades mecânicas e físicas do material constituinte da estrutura do Convento de Santa Maria de Aguiar, deste modo e após inspeções de reconhecimento procedeu-se a uma caracterização dos elementos estruturais e à realização de ensaios laboratoriais.

Inicialmente foram abordados os elementos estruturais e o seu papel numa estrutura de alvenaria estrutural, e perceber que o principal objectivo das estruturas góticas é concentrar as forças pelas partes mais resistentes da estrutura o máximo possível, tornando a estrutura mais alta e ligeira possível, no entanto há elementos que são de origem românica, como os contrafortes e os fortes pilares, em que o seu papel é dispersar as forças tanto possível por toda a estrutura. Assim neste tipo de estrutura o critério mais importante é a estabilidade, tal critério é assegurado quando a resistência à tracção é nula, a resistência à compressão é aproximadamente infinita e atrito entre os blocos é elevado de modo a não haver deslizamentos. O colapso de uma estrutura de alvenaria estrutural depende assim do número de rótulas plásticas que se formam facilitando assim a formação de um mecanismo. Assim a estabilidade é assegurada quando a linha de pressões fica inteiramente dentro da estrutura, e quando esta linha de pressões é única, há formação das tais rótulas que originam o colapso da estrutura.

De modo a caracterizar o material constituinte da estrutura foram realizados ensaios laboratoriais, como o ensaio de compressão uniaxial, o ensaio para determinação do módulo de

elasticidade e coeficiente de Poisson e massa volúmica. Assim de acordo com as técnicas usuais para esta caracterização foram determinados valores das características do granito, como à resistência à compressão, 111,5 MPa, o coeficiente de Poisson, 0,21, o módulo de elasticidade de 40 GPa, e um peso volúmico de 24,01 kN/m³. No entanto o módulo de elasticidade e a resistência à compressão foram considerados valores elevados, para este tipo de alvenaria, adoptando-se assim o valor de 15 GPa para o módulo de elasticidade e 55 MPa de resistência à compressão, valores estes que foram referenciados por outros autores para este tipo de material estrutural como anteriormente mencionado.

Este capítulo foi fundamental para perceber melhor o comportamento do material constituinte da estrutura e também conhecer os aspectos construtivos e o comportamento de todos os elementos estruturais constituintes do Convento de St^a Maria de Aguiar, ajudando assim a uma melhor compreensão do edifício para uma melhor caracterização e modelação numérica. Como será abordado no capítulo IV.

4 CAPÍTULO IV - MODELAÇÃO NUMÉRICA DO CONVENTO DE SANTA MARIA DE AGUIAR

4.1 Introdução

“A modelação numérica é um conjunto de operações numéricas que visam a construção de modelos matemáticos baseados na geometria e nas propriedades mecânicas” [Macchi,92]

Neste capítulo ir-se-á descrever todo o processo que levou à obtenção do modelo matemático que se adoptou.

A modelação traduz-se numa formulação matemática capaz de descrever o real funcionamento de uma estrutura, esta modelação pode ser realizada recorrendo a modelos do tipo discretos ou contínuos, apresentando assim o comportamento mecânico dos materiais da estrutura. No presente existem ferramentas que permitem estudar construções históricas de elevada complexidade, normalmente baseadas na aplicação do método dos elementos finitos.

O método dos elementos finitos consiste em representar a estrutura através de conjuntos de elementos onde em cada elemento são estabelecidas equações de compatibilidade nos nós comuns a cada elemento. Em alvenaria estrutural as condições de continuidade entre os elementos é difícil estabelecer, ao contrário do que acontece em estruturas de betão armado, a ligação entre os elementos é monolítica, na alvenaria os elementos estão simplesmente apoiados possibilitando rotações relativas nas zonas de contacto.

Desta forma a modelação é realizada através do programa de cálculo “Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010”. De salientar que este software apenas realiza uma análise elástico-linear para este tipo de modelação, modelação esta que foi realizada em elementos de casca espacial.

4.2 Descrição Geral do Convento

O convento de St^a M^a de Aguiar é um monumento de alvenaria de pedra do século XII, sendo este constituído por um edifício principal, A igreja do Real Convento de Santa Maria de Aguiar, e por um edifício, onde se situa a sala do capítulo, este que anteriormente faria parte do claustro, que haverá sido devastado.

A igreja é constituída por uma nave central, sendo esta constituída por abóbadas de cruzeira simples e um tecto de madeira descoberto, em duas águas e dois transeptos também em abóbadas e de planta quadrada. No primeiro tramo das naves conserva-se um antigo coro com um arco abatido que o apoiava. Os arcos constituintes da igreja são caracterizados por serem bastante elevados e com desenvolvimento em profundidade, principalmente o arco por cima do altar-mor. Na parte lateral da igreja encontram-se arcos concorrentes entre si cujos quais formam abobadas.

O exterior da igreja é toda rodeada por contrafortes que ancoram as abobadas interiores. É bem visível os diferentes entra a nave central e os transeptos.

4.3 Caracterização Geométrica da Igreja

A caracterização envolve uma primeira fase, a de inspecção preliminar, onde se incluem informações gerais do edifício, mais especificamente informações sobre a estrutura, estas foram acompanhadas de visitas ao local. Posteriormente haveria necessidade de fazer um levantamento de todas as peças fundamentais para a presente tese, estas peças foram obtidas através de documentos fornecidos por diversas entidades, e com recurso a alguns métodos tradicionais de medida. Após a análise destes dados procedeu-se à caracterização geométrica do Convento.

4.3.1 Recolha de Elementos

De modo a caracterizar correctamente a geometria, procedeu-se à recolha de elementos que indicassem as dimensões e posicionamento dos diferentes elementos estruturais, esta recolha foi realizada através de pesquisas bibliográficas relativas ao monumento e através dos documentos/desenhos fornecidos pelo Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico, nomeadamente plantas, alçados e cortes. Estes desenhos foram resultado de levantamentos topográficos realizados por uma empresa contratado para o efeito, tornando-se assim fundamentais para uma caracterização do modelo 3D da estrutura mais rigorosa. Todos os outros elementos que suscitaram dúvidas na sua caracterização ou interpretação foram analisados através da visualização e medições in situ ou de registos fotográficos. Como foi o caso dos contrafortes, pilares e arcos. Assim, distinguem-se como elementos estruturais, 14 contrafortes, 6 pilares, 3 arcos e 4 abóbadas nervuradas.

Nas figuras a seguir são apresentados alguns desenhos disponibilizados pelo IGESPAR (Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico).

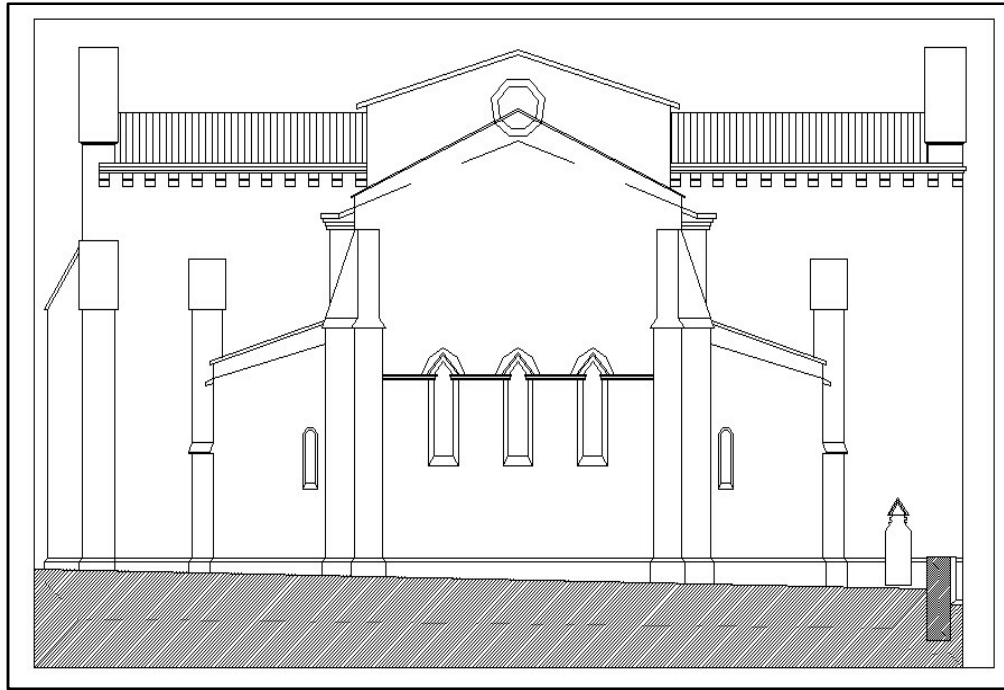


Figura 4-1 - Alçado Sul



Figura 4-2 - Alçado Norte

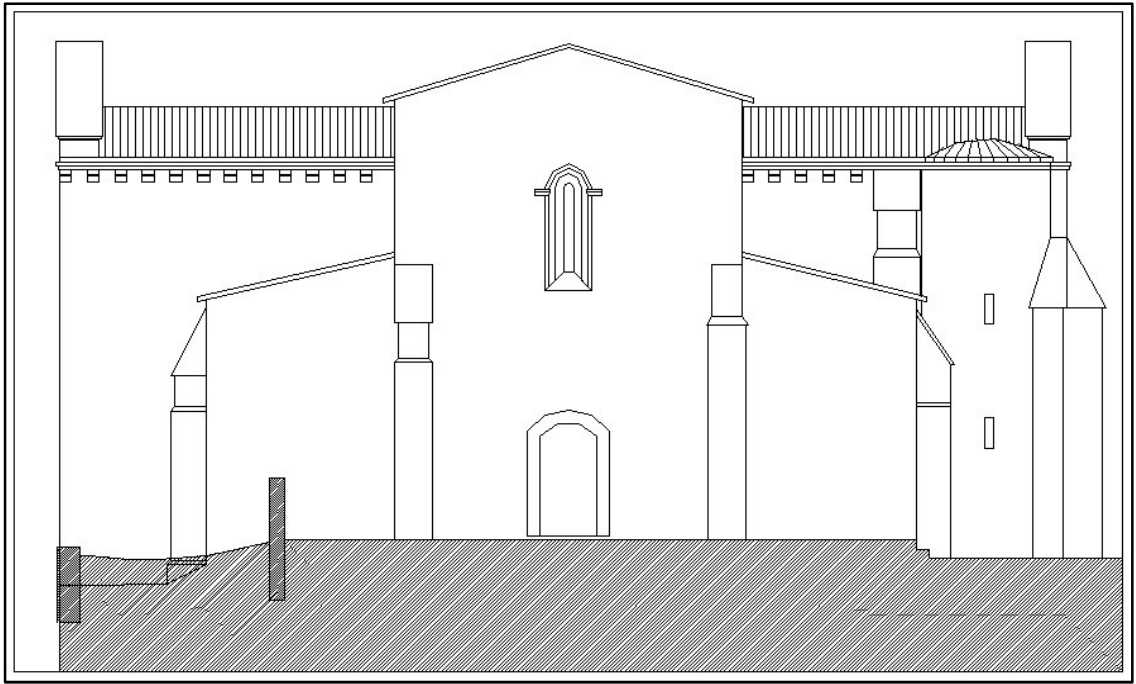


Figura 4--3 - Alçado Poente



Figura 4-4 - Alçado Nascente

Após estudo destes desenhos, conclui-se uma ligeira simetria da estrutura do convento segundo um plano que atravessa a porta principal ao altar (Figura 4-5), o que facilita deste modo a discretização final da igreja.

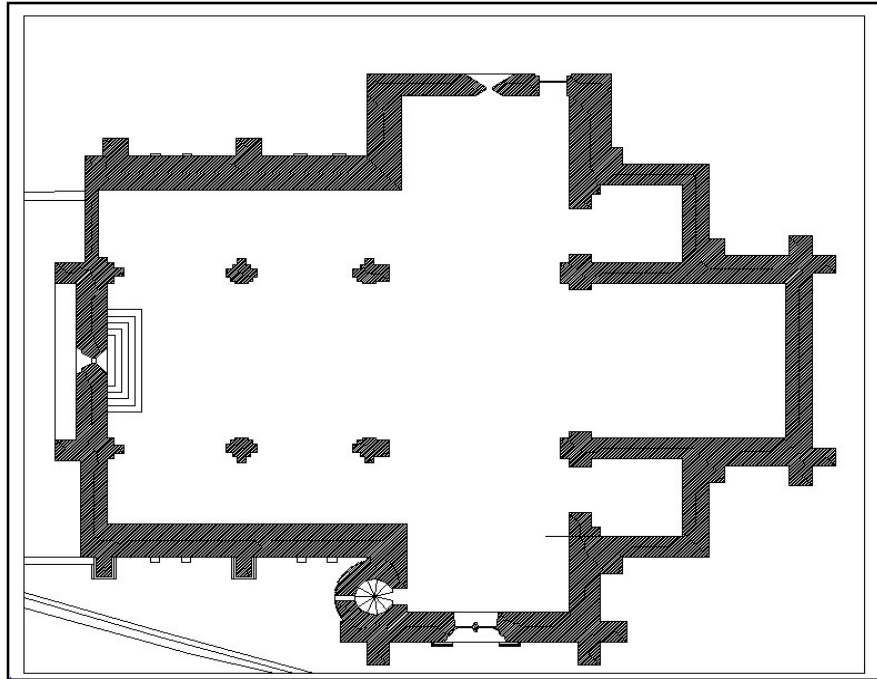


Figura 4-5 - Planta do Convento



Figura 4-6 - Corte

Informações estas que foram complementadas com visitas ao local e registos fotográficos, permitindo assim uma maior clarificação de algumas duvidas aquando da realização do modelo e a confirmação/ajuste de algumas medidas.

Após a recolha e a caracterização destes elementos procedeu-se à realização do desenho em 3D das peças estruturais com recurso a um software de desenho assistido por computador. (Figura 4-7 e 4-8)

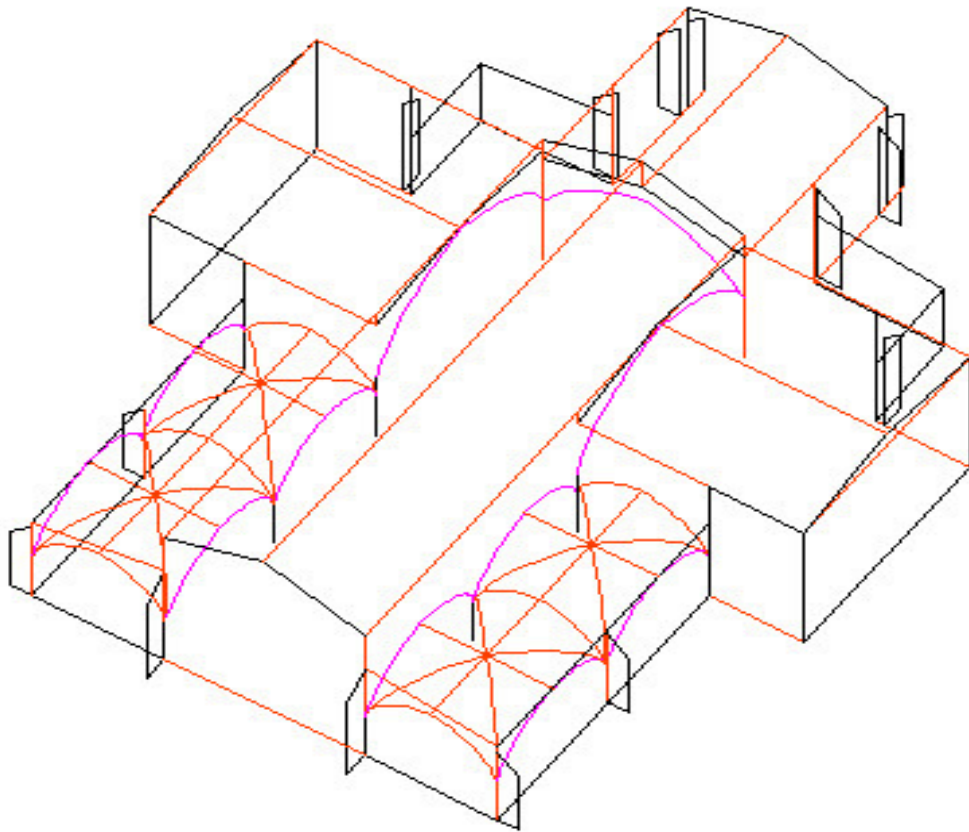


Figura 4-7 - Concepção 3D do Convento por linhas

4.4 Modelação da Estrutura do Convento

Após a análise dos elementos constituintes do convento e da caracterização geométrica através dos desenhos realizados, passou-se então para a modelação numérica da estrutura, através do método dos elementos finitos com recurso a um tipo de análise Elástico Linear. Tratando-se este método, de um método baseado em conceitos e procedimentos relativamente simples consegue assim dar resposta a várias situações de modelação de estruturas com geometria complexa. Esta técnica de modelação de estruturas é bastante adequada quando se pretende obter resultados a nível do estado de deformação e tensão instalados na estrutura. Esta modelação será realizada com o Software Robot Structural Analysis 2010® através de uma metodologia de análise Elástico Linear.

4.4.1 Utilização do Programa Autodesk Robot Structural Analysis

Como anteriormente referido, a modelação do convento em estudo com recurso ao Software Robot Structural Analysis 2010®, software este que foi desenvolvido inicialmente pela Robobat® e posteriormente adquirido pela Autodesk®. Este software é um software de cálculo de estruturas que proporciona soluções de análise para variados tipos de estruturas, incluindo edifícios, pontes, estruturas em projectos de engenharia civil e estruturas especiais. Este programa dispõe de uma vasta biblioteca de módulos integrados de projecto para betão armado e aço, baseados em mais de 70 códigos para variados países, que simplificam o processo de modelação estrutura. Na presente tese, a estrutura em questão é constituída por alvenaria estrutural, material este cujas propriedades físico mecânicas não se encontram na base de dados nem predefinidas no programa, assim o programa permite ao utilizador criar um novo material com a introdução destas propriedades. Para a definição geométrica da estrutura a analisar, este programa permite uma interface bastante intuitiva com outros programas da Autodesk®, como é o caso do AutoCAD® ou do Autodesk® Revit Structure, sendo que neste trabalho é aproveitada esta funcionalidade, e assim sendo a estrutura é primeiramente desenhada em AutoCAD® e de seguida importada para o Autodesk® Robot Structural Analysis, onde é completada a definição dos elementos estruturais. Este programa inclui também ferramentas automáticas de definição de malhas aplicando o método dos elementos finitos, que podem ser manipuladas e refinadas, facilitando o trabalho de modelação, mesmo para espaços de modelação mais complexos.

Para além de permitir uma eficiente e simplificada análise estática e linear de carácter geral, o Autodesk® Robot Structural Analysis permite, também, explorar alternativas de projecto e investigar o comportamento não-linear de uma estrutura, permitindo uma análise de muitos tipos de não-linearidades.

Os resultados provenientes das modelações efectuadas no programa podem ser visualizados em partes individuais, em partes da estrutura ou para a estrutura como um todo sob a forma de diagramas e mapas. Os resultados tabulares podem ser filtrados para mostrarem dados específicos e transferi-los para folhas de cálculo, para pós-processamento de dados pelo utilizador. Este programa dispõe ainda, de boas ferramentas de output, como a funcionalidade de composição de documentos impressos que permite gravar tabelas e visualizações do espaço de modelação num esquema definido pelo utilizador.

Este software oferece uma interacção com programas externos como Microsoft Excel® ou Microsoft Word® ou criar aplicações modulares e rotinas para correr no programa.

4.4.2 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos não é mais que uma ferramenta matemática que permite resolver diversos problemas, nomeadamente em estruturas. O método dos elementos finitos desenvolve-se em duas etapas. Inicialmente é feita a discretização espacial por elementos finitos, permitindo que os nós da malha se movam, dando origem a um sistema de equações diferenciais ordinárias em que as incógnitas são em cada instante o valor da variável dependente nos nós espaciais assim como a posição desses mesmos nós. Numa segunda fase este sistema é resolvido recorrendo a um integrador apropriado. Ou seja, o método dos elementos finitos é uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais, sendo este uma equação que envolvendo uma função incógnita de várias variáveis independentes e suas derivadas. Assim são estabelecidas equações de compatibilidade nos nós comuns a cada elemento da estrutura.

Em Engenharia Civil o método dos elementos finitos apresenta actualmente um nível de desenvolvimento que permite a sua utilização pela generalidade dos projectistas de estruturas. Enquanto que no passado muitos dos utilizadores do método dos elementos finitos estavam também envolvidos na respectiva programação em computador, verifica-se hoje em dia que a quase totalidade dos projectos de estruturas são executadas ou analisadas com recurso a enunero software onde este método é utilizado e apenas há a preocupação da interpretação dos resultados obtidos.

O método dos elementos finitos surge assim como uma ferramenta matemática de enorme valor para o cálculo estrutural devido à sua facilidade de execução e ao rigor dos resultados obtidos.

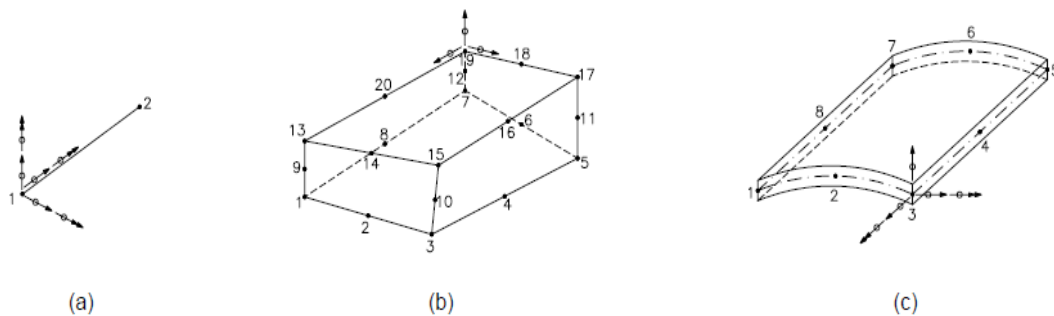


Figura 4-8 - Elementos finitos usualmente empregues em Análises Estruturais; (a) Elemento de Viga Tridimensional; (b) Elemento Sólido; (c) Elemento em Casca Espacial.[Sara Mourão, 01]

4.4.3 Analise Elástico Linear

A análise elástica é um tipo de análise que admite que os materiais são dotados de um comportamento linear elástico, ou seja as deformações aumentam proporcionalmente ao aumento das cargas aplicadas no material, quer sejam estas de compressão ou de tracção, e aquando da remoção dessa mesma carga, este tem uma recuperação total dos seus deslocamentos, no entanto a maioria dos materiais apresenta um comportamento de não linearidade.

No caso da alvenaria estrutural, o comportamento linear do material é limitada e falível, pois a alvenaria não resiste a esforços de tracção, logo, no instante do aparecimento de fendas, o material deixa de ter um comportamento elástico linear.

No entanto a partir da análise linear podem ser identificadas zonas onde ocorrerá essa fendilhação, em zonas onde aparecem os esforços de tracção, se nessas zonas se atribuir um módulo de elasticidade do material perto do valor zero, ao se executar novamente a análise linear elástica os resultados obtidos consideram os efeitos de fendilhação. Esta análise modificada revela-se um tipo de análise iterativa não existindo uma garantia que a solução vá ser aproximada de uma análise não linear do material.

Este tipo de análise não é de todo a mais adequado para analisar correctamente o comportamento estrutural de um edifício de alvenaria, devido à pouca resistência à tracção deste, adoptando assim as mesmas características tanto de tracção como de compressão mantendo-se constantes para todos os níveis de carga. A utilização de uma análise elástica e a tentativa de ajustar o modelo estrutural o mais possível à realidade serve para identificar as zonas mais críticas da estrutura, podendo assim definir-se uma malha de elementos finitos mais refinada nessas zonas de modo a obter resultados com mais exactidão.

4.5 Ajuste do Modelo Estrutural

A modelação do convento teve por base as plantas e medições definidas na fase da sua caracterização geométrica, nessa fase foram identificados os vários elementos estruturais e sua disposição em planta, admitindo uma simplificação a nível de simetria do convento para esses elementos (Figura 4-9).

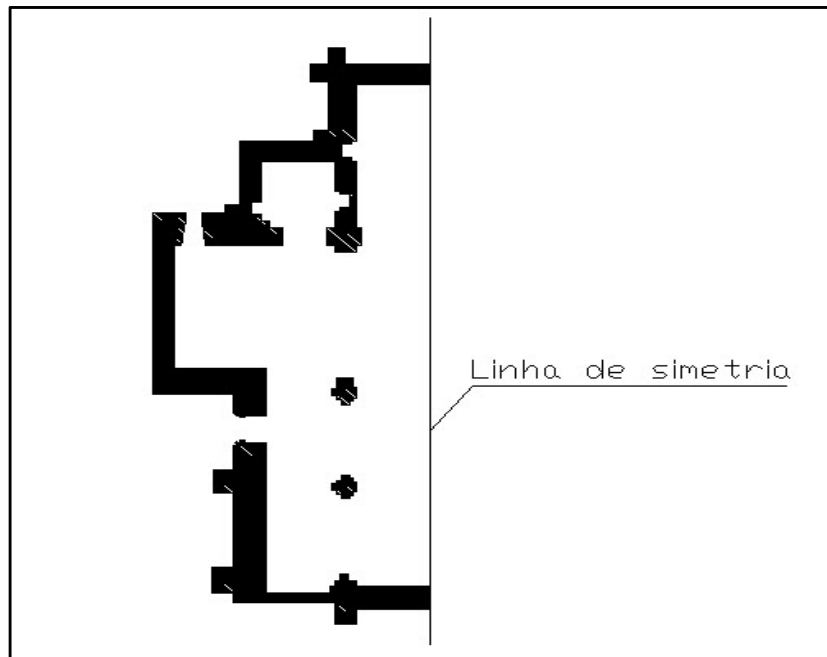


Figura 4-9 - Esquema de simetria da planta do Convento

Após a caracterização geométrica dos vários elementos estruturais e de ser desenhada em 3D, a estrutura do convento, em software de desenho assistido por computador, de acordo com as plantas e cortes fornecidos, fez-se a importação destes elementos para o software de cálculo Robot através do ficheiro gerado no CAD (desenho assistido por computador), depois de o modelo estar já implementado no Robot procedeu-se à modelação propriamente dita dos elementos, a qual consistiu em definir os modelos de cascas para todo o contorno das paredes de alvenaria estrutural, dos contrafortes, dos arcos e das abóbadas e à introdução das respectivas espessuras destes elementos; definir apoios fixos lineares em todo o contorno da estrutura; e representação das cargas provenientes do peso da cobertura, pois esta não é considerada parte integrante da estrutura.

1º Passo: Exportação do ficheiro criado em CAD em formato *.dxf e posterior importação em Robot.

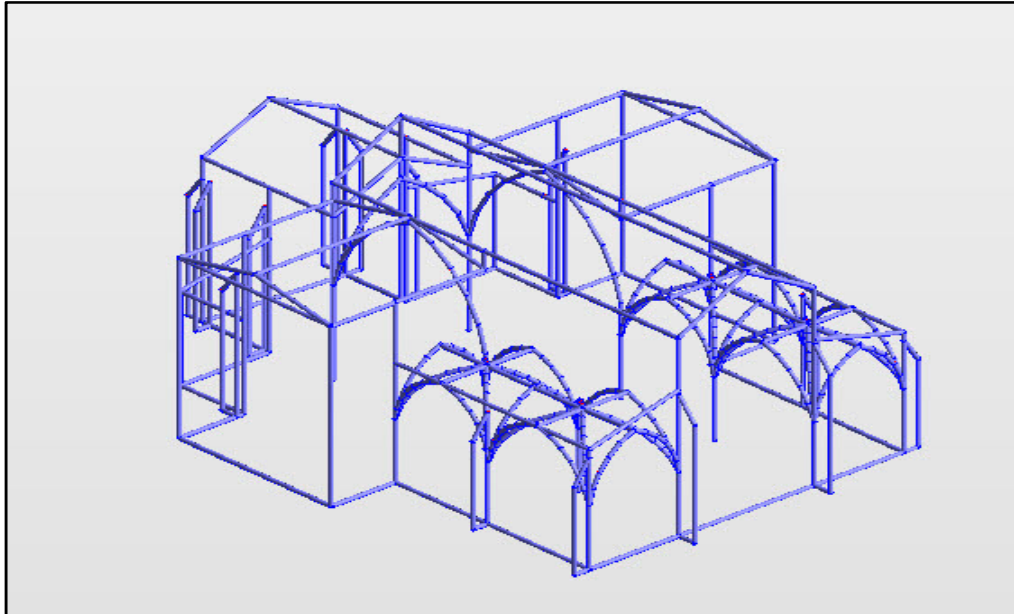


Figura 4-10 - Modelo em 3D por barras do Convento no software Robot

2º Passo: Criação dos painéis ou elementos casca referentes aos elementos estruturais (Paredes, contrafortes, arcos e abóbadas)

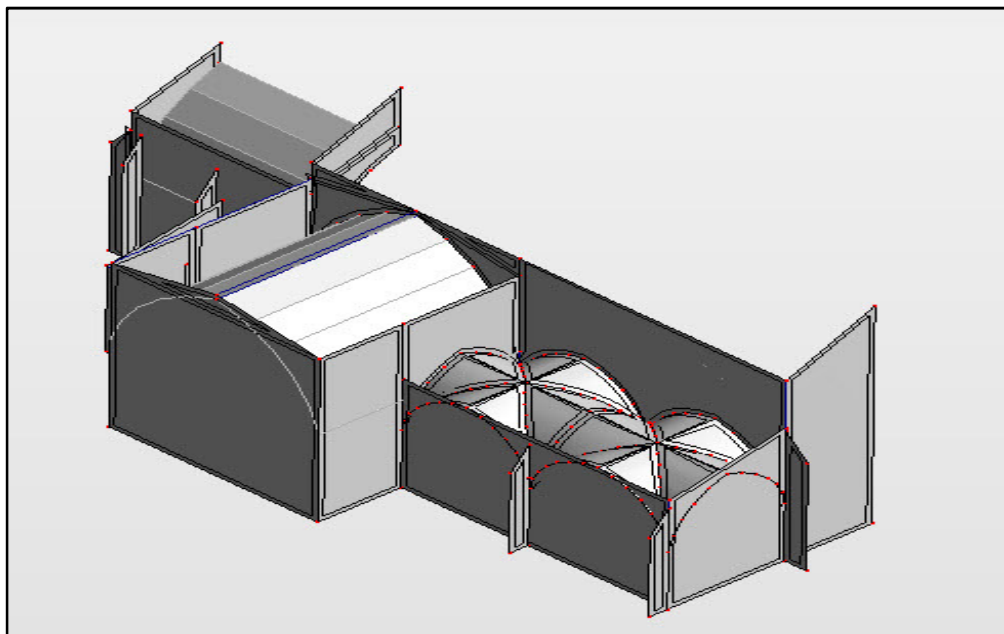


Figura 4-11 - Modelação por elementos de casca

3º Passo: Geração da malha dos elementos finitos para os painéis atrás referidos. Estas malhas de elementos finitos foram geradas com os seguintes parâmetros: Triângulos e quadrados em todo o seu contorno, e com um tamanho de refinamento de 0,20m.

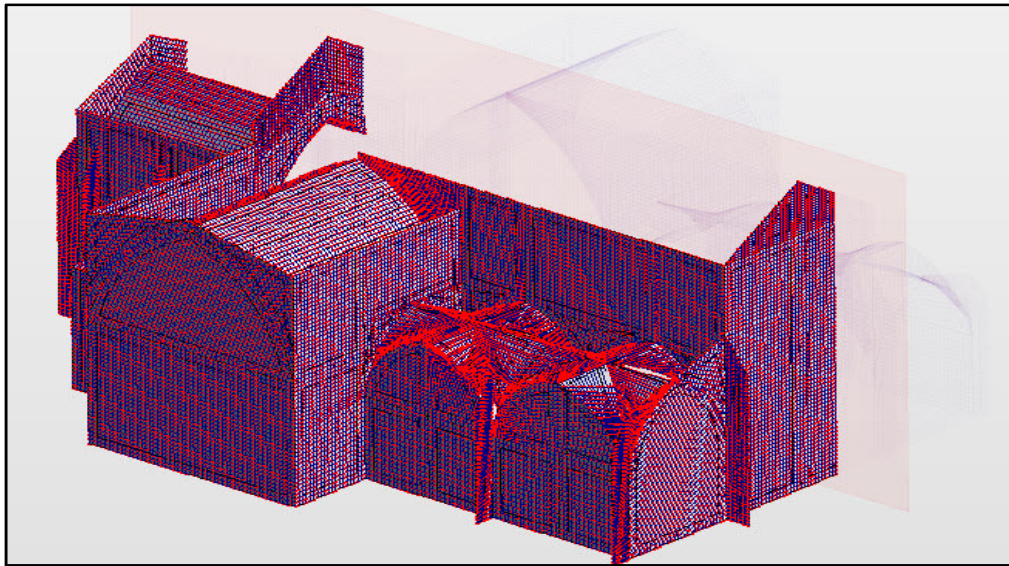


Figura 4-12 - Malha dos elementos finitos para os elementos de casca

Após esta fase, houve a necessidade de afinar o modelo, pois havia incoerência nas malhas dos elementos finitos geradas na intersecção e ligações entre alguns painéis, de modo a corrigir este problema foi necessária refinar nessas zonas a malha dos elementos finitos ou introdução de novos painéis nas zonas mais críticas, e assim gerada uma malha mais refinada, de modo a haver uma perfeita ligação entre todo o tipo de painéis.

4º Passo: Criação dos apoios em todo o contorno da estrutura (Apoios fixos em todas as direcções)

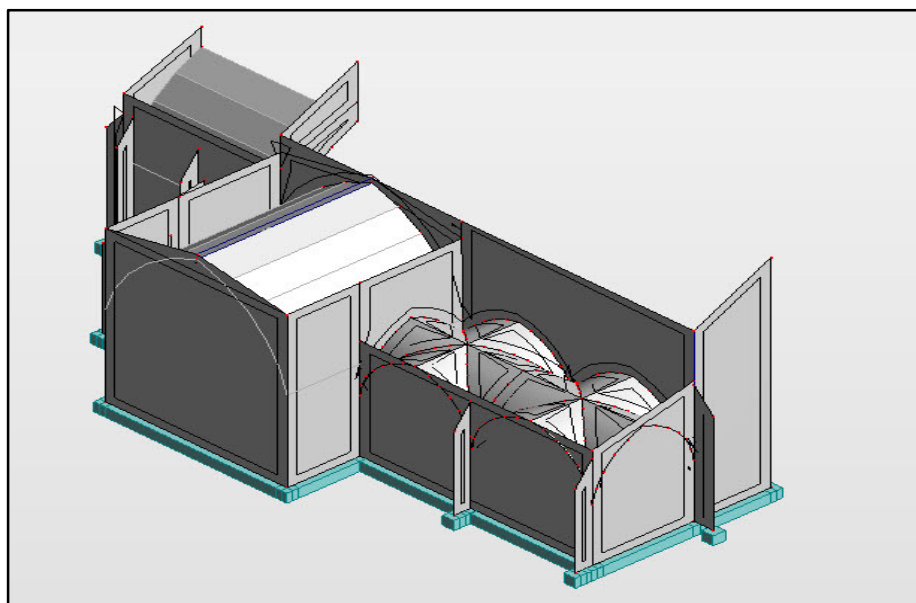


Figura 4-13 - Estrutura com apoios fixos

Posteriormente foi necessário introduzir no software Robot os valores das propriedades dos materiais, pois este não possui na sua base de dados os parâmetros para a alvenaria estrutural, assim e de acordo com os valores anteriormente caracterizados no capítulo III foram definidas no software esses novos parâmetros, como mostra a figura 4-14.

The image shows a dialog box in the Robot software for defining material properties. The 'Other' tab is selected. The 'Name' field is set to 'granito' and the 'Description' is 'Granito'. Under the 'Elasticity' section, the Young modulus (E) is 15000,00 MPa and the Poisson ratio (ν) is 0,21. Under the 'Resistance' section, the Design resistance is 55,00 MPa. The Force density (unit weight) is 24,01 kN/m3. At the bottom, there are buttons for 'Add', 'Delete', 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Figura 4-14 - Valor das características do granito da estrutura introduzidos no Robot

Todos os pilares da estrutura são modelados como elementos barra e com o material de alvenaria, todos eles apresentam a secção de 80x80cm. No quadro seguinte são mostrados todos os valores das secções e material.

Quadro 4-1 - Descrição do material e do tipo de modelação para os pilares da estrutura

Barra	Nó 1	Nó 2	Seção	Material	Gama (Deg)	Tipo	Objecto de estrutura
25	35115	36554	80x80granito	granito	180,0	RC beam	Barra
32	36	37	80x80granito	granito	0,0	RC beam	Barra
42	45	46	80x80granito	granito	0,0	RC beam	Barra
47	32296	32297	80x80granito	granito	180,0	RC beam	Barra
56	32347	32348	80x80granito	granito	180,0	RC beam	Barra
550	54	235	80x80granito	granito	0,0	RC beam	Barra
*							

As paredes, contrafortes, abóbadas e arcos foram modelados como elementos casca/painéis, num total de 192 elementos, sendo estes elementos estruturais foi então necessário atribuído um valor da espessura bem como o material que o constitui como ilustra a figura seguinte.

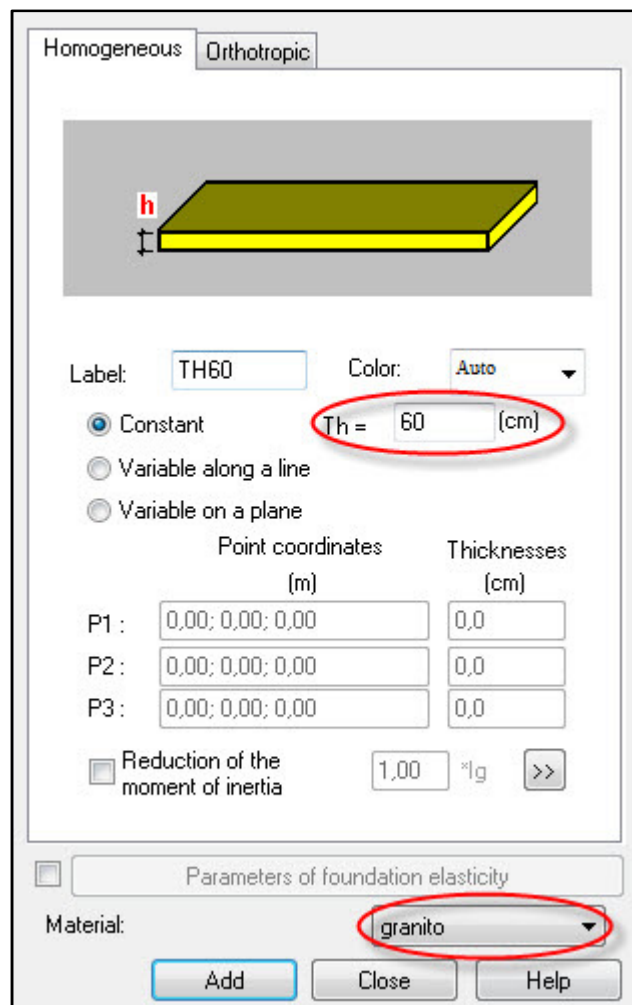


Figura 4-15 - Propriedades dos elementos casca da estrutura introduzidos no robot

Quadro - 4.2 - Exemplo das características da malha dos elementos finitos para 5 painéis

Painel	Espessura	Material	Tipo de malha	Tipo de armação	Objecto de estrutura	Malha bloqueada
2	granito 60	granito	Coons	RC shell	Painel	Sim
3	granito 60	granito	Coons	RC shell	Painel	Sim
4	granito 60	granito	Coons	RC shell	Painel	Sim
5	granito 60	granito	Coons	RC shell	Painel	Sim
6	granito 60	granito	Coons	RC shell	Painel	Sim

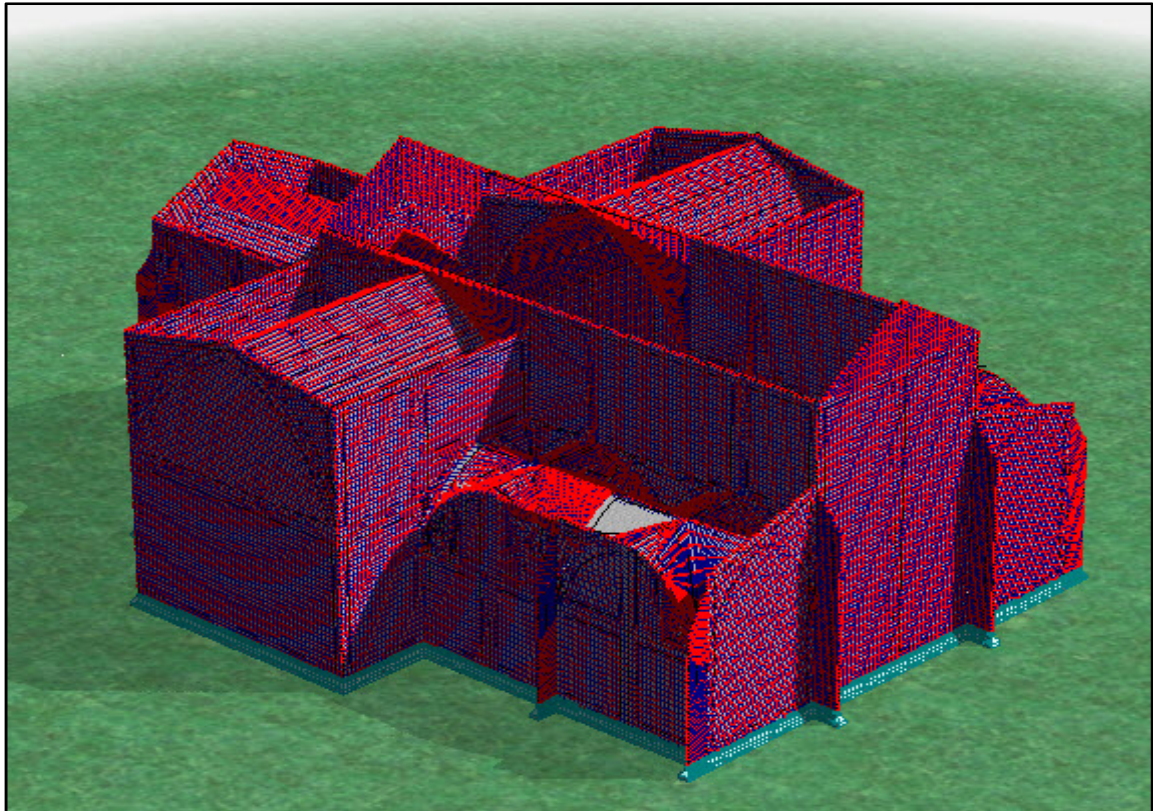


Figura 4-16 - Vista geral da estrutura com a malha dos elementos finitos e apoios

4.6 Conclusões

Este capítulo foi dedicado à descrição das diversas etapas que levam à modelação numérica no software Autodesk® Robot Structural Analysis do Convento de Santa Maria de Aguiar. Após caracterização das diversas características da estrutura, seguiu-se então uma análise mais detalhada da geometria, análise esta que teve como ponto de partida a recolha de informação fornecida pelo IGESPAR (Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico). Esta fase foi importante pois permitiu localizar geometricamente os vários elementos estruturais, suas dimensões, compreender a complexidade da estrutura, e assim poder proceder a simplificações geométricas necessárias para melhor poder caracterizar a estrutura em estudo.

A modelação da estrutura do Convento foi realizada com base no método dos elementos finitos, estas malhas dos elementos finitos foram geradas nos painéis/cascas dos elementos estruturais. É de salientar as grandes dificuldades que apareceram na modelação desta estrutura, não só pela sua complexidade geométrica (formas em arco e abóbadas), mas também na geração da

malha dos elementos finitos, devido à compatibilidade que é necessário garantir entre todos os elementos estruturais de modo a garantir a transmissão dos esforços e impedir os deslocamentos relativos nas zonas de contacto entre elementos ou na base do convento.

Por fim houve necessidade de introduzir no software o valor das propriedades mecânicas dos materiais estruturais, apresentadas no capítulo III, pois o software não possui na sua base de dados os parâmetros para este material.

5 CAPITULO IV - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO SÍSMICO DO CONVENTO DE SANTA MARIA DE AGUIAR

5.1 Introdução

O estudo do comportamento de edifícios sacros antigos, tendo em conta a sua capacidade de resistência estrutural, é útil e de grande interesse devido aos inúmeros edifícios deste tipo, cuja segurança e preservação é importante garantir pelo que eles representam no universo patrimonial de Portugal. No entanto este tipo de obras é representativo de dificuldades de caracterização, muito devido ao desconhecimento dos processos construtivos e a danos que poderão já existir, às tentativas que serão necessárias para afinar o modelo matemático, e também devido à complexidade estrutural /arquitectónica que estes edifícios apresentam.

Neste capítulo irá ser apresentada uma metodologia para caracterizar analiticamente o Convento de St^a Maria de Aguiar, a partir da modelação da estrutura do convento realizada e descrita no Capítulo 4 e da determinação de parâmetros dinâmicos (frequências e modos de vibração), onde são associados características mecânicas isotrópicas dos materiais. Esta caracterização e cálculo serão realizados em regime linear elástico.

No sentido de avaliar a capacidade de certos edifícios e monumentos aos sismos, é fundamental conhecer os parâmetros que estão associados a esta análise dinâmica, assim, a análise dinâmica foi realizada de acordo com o “Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos” com a implementação do Anexo Nacional: NP EN 1998-1:2009 na qual estão referidos os seguintes aspectos: Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP), Anexos informativos, e às Informações Complementares não contraditórias.

Este capítulo é finalizado com a interpretação dos resultados e conclusões mais relevantes sobre a análise efectuada.

5.2 Descrição do Modelo Estrutural

Como anteriormente foi descrito, a modelação numérica do Convento de St^a Maria de Aguiar foi concebida através do programa de Cálculo Autodesk Robot Structural Analysis Professional

2010, através do uso de painéis em casca espacial, formando estes um total de 192, gerando assim uma malha por estes elementos constituída por 70725 nós. A análise final do seu comportamento dinâmico foi realizado de acordo com esta malha, através do modelo de comportamento linear elástico, tendo sido toda a estrutura caracterizada por igual, ou seja, os materiais constituintes apresentam características homogêneas e isotrópicas.

Os parâmetros mecânicos e físicos que caracterizam a alvenaria de granito, e cujos quais o software necessita para realizar a análise foram: peso volúmico (ρ), módulo de elasticidade (E) e coeficiente de poisson (γ). Estes valores vêm de acordo com os resultados apresentados no capítulo III obtidos através dos ensaios de caracterização mecânica realizados no laboratório.

Sendo estes elementos estruturais constituídos todos pelo mesmo material, foi então adoptado o mesmo valor dos parâmetros acima referidos a todos esses elementos para toda a malha dos elementos finitos do modelo numérico do Convento, pois não foi possível extrair amostras do material para cada elemento estrutural.

5.3 Caracterização da Acção Sísmica

Os sismos são fenómenos naturais que resultam de uma súbita libertação de energia ocorrida numa falha, devido a uma rotura que tem início no hipocentro. Esta libertação de energia está associada aos movimentos tectónicos, isto é, às acções que originam a formação do relevo da crosta terrestre e fenómenos associados: deslocamentos, roturas e enrugamentos da camada superficial, que envolve o globo terrestre, onde predomina as rochas de tipo granítico. Esta camada exterior que sustenta os continentes e bacias oceânicas é interligada na base por uma espessa placa rígida, relativamente fria, de rocha basáltica, apoiando-se na astenosfera, bastante mais rígida que a anterior. Esta placa está fracturada em outras placas das quais se distinguem as placas Euro-Asiática, Norte Americana e Africana, placas estas que pela sua localização afectam o território português, principalmente do resultado das instabilidades na fronteira das placas Africanas e Euro-Asiática sendo o epicentro mais activo localizado no Banco de Gorringe; constitui uma crista submarina situada a sudoeste do Cabo de S. Vicente.

Como os sismos são fenómenos que resultam em libertação de energia, há então várias maneiras de quantificar a sua dimensão. Para quantificar um sismo consideram-se duas grandezas: a Intensidade (I) e a Magnitude (M). Magnitude foi um conceito introduzido pelo sismólogo Charles Richter e define-se como a quantidade de energia libertada pelo sismo. A magnitude é obtida pelo logaritmo decimal de amplitude máxima do movimento sísmico, expresso em microns, dada por um sismógrafo de torção colocado a 100km do foco do sismo. Para quantificar a magnitude é utilizada a escala de Richter. Define-se intensidade como a grandeza de um sismo em função dos seus efeitos nas populações, construções e ambiente, variando em função da sua distância ao epicentro. A noção de intensidade está ligada à aceleração ou seja, aos efeitos do sismo nos diferentes locais, sendo portanto qualitativa e baseada no comportamento das construções e efeitos sobre a natureza. Para quantificar a intensidade sísmica é utilizada a escala de Mercalli-Sieberg. [Correia dos Reis, Brazão Farinha, 08]

A caracterização da acção sísmica é de elevada complexidade devido às incertezas associadas a este fenómeno, tais como a intensidade que possam vir a ocorrer e a maneira como a energia é libertada ao longo do tempo. Os movimentos associados a esta acção são registados sob a forma de gráficos onde são registadas as acelerações, designados assim de acelerogramas onde cada sismo é geralmente quantificado pela duração e frequência e pico de aceleração. [Campos Costa, 93]

Assim, segundo o EC 8 [EC8 ,94] e com as respectivas correcções apresentadas no Documento Nacional de Aplicação [DNA, 98] classificou-se acção sísmica como uma acção do Tipo I (Sismo de magnitude moderado, a pequena distância focal e duração de 10 segundos) a actuar na região onde se localiza o Convento de St^a Maria de Aguiar, denominada de zona D, com uma classe de solo do tipo A (solos rijos, dada a natureza rochosa do maciço de fundação), e com

uma aceleração máxima de 1 m/s^2 , correspondente a um sismo próximo e a um período de retorno de 3000 anos.

Quadro 5-1 - Valores característicos para uma acção sísmica do tipo I, solo tipo A em zona D

Tipo de terreno	S _{max}	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)	B ₀	K ₁	K ₂	η
A	1,0	0,05	0,25	1,2	2,6	1	2	0,05

Onde:

T_B - Limite inferior do troço de aceleração constante

T_C - Limite superior do troço de aceleração constante

T_D - Valor que define o troço de deslocamento constante

S - Factor do solo

η - Factor de correcção do amortecimento

5.3.1 Análise da Resposta Sísmica da Estrutura

De modo a caracterizar o comportamento para acção sísmica da estrutura procedeu-se a uma análise sísmica no software. Para tal escolheu-se a opção de análise sísmica segundo o eurocódigo 8 e norma ENV 1998-1-1:2000 NAD Portuguesa, onde posteriormente são inseridos os valores correspondentes à acção sísmica, como a zona sísmica, o tipo da acção sísmica e as características do solo, características estas faladas anteriormente neste capítulo, representativas de uma análise espectral elástica segundo a direcção horizontal. Assim e com base nestes parâmetros fez-se a análise sísmica de acordo com a seguinte combinação:

$$1,35.CP + \psi_0 \text{ Sismo}$$

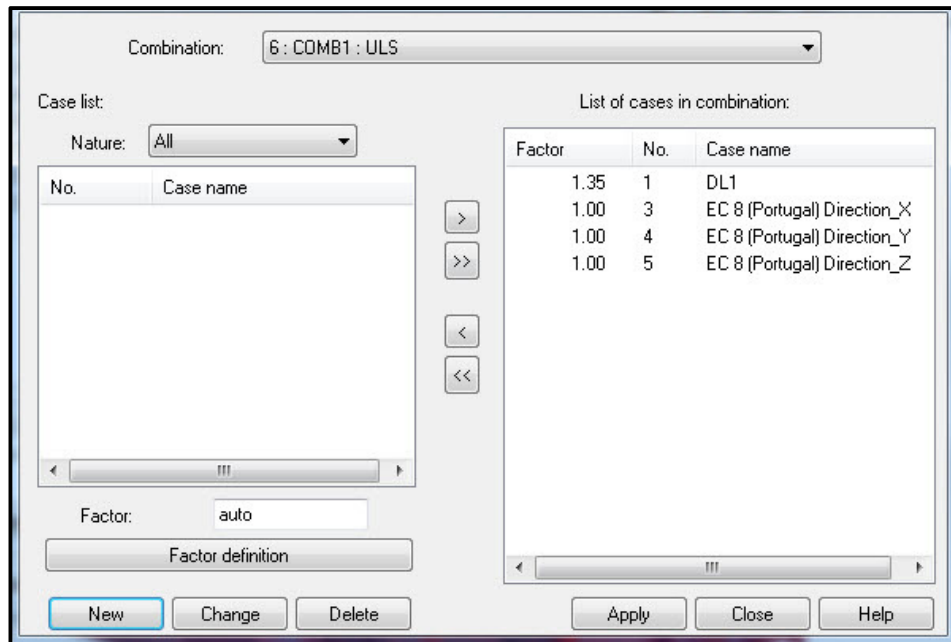


Figura 5-1 - Combinação sísmica

5.3.2 Interpretação de resultados

5.3.2.1 Análise Estática Linear

De modo de a averiguar a capacidade resistente e vulnerabilidade da estrutura foi calculado um estado de tensão inicial de compressões e tracções e deformada no Convento sob a acção do seu peso próprio, representativo de um cálculo estático. Assim conclui-se que as maiores tensões ocorrem predominantemente junto às transições das paredes com os arcos e as abóbadas, nas paredes de suporte dos arcos, e nos contrafortes (Figura 5-12 e 5-13).

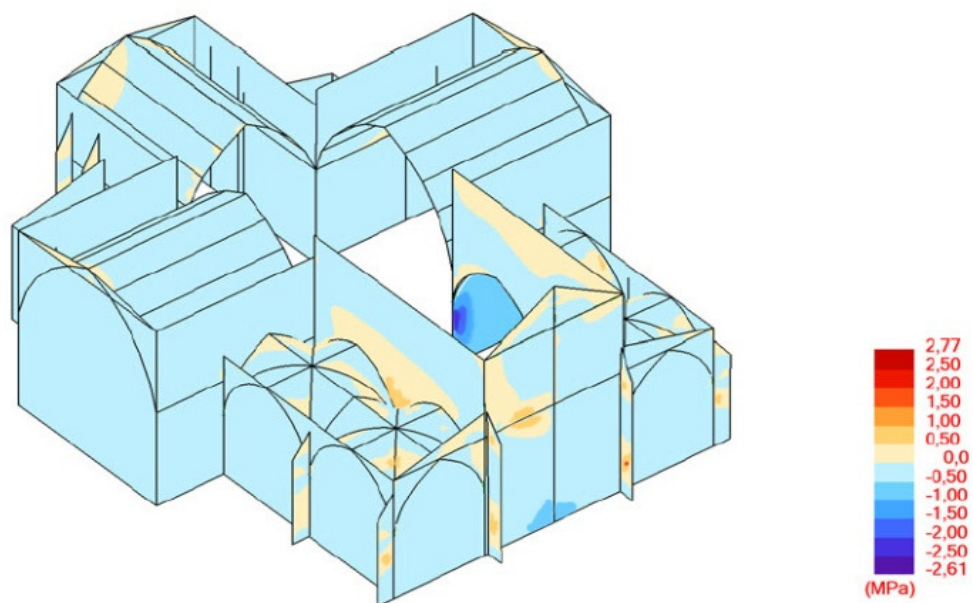


Figura 5-2 - Tensões principais devidas ao peso próprio (máx = 2,77 MPa) (Estrutura total)

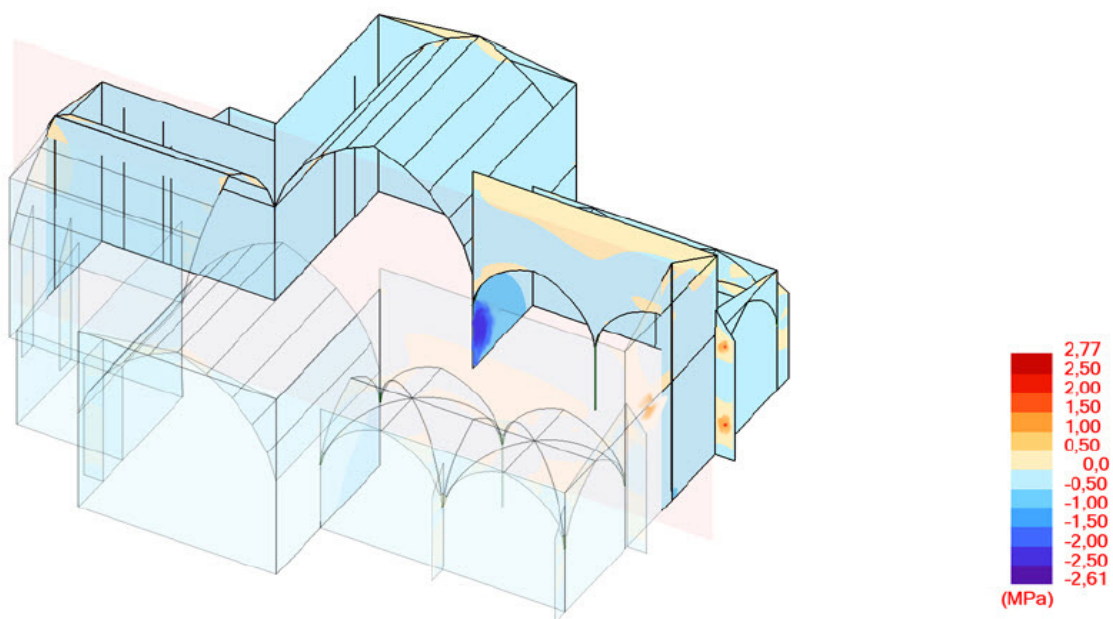


Figura 5-3 - Tensões principais devidas ao peso próprio (máx = 2,77 MPa) (Metade da Estrutura)

Sendo que o deslocamento máximo da estrutura devido ao peso próprio apresenta um valor de 2,9mm.

5.3.2.2 Comportamento Dinâmico da Estrutura

A análise do comportamento sísmico do Convento e a sua segurança estrutural foi realizado com o recurso a uma análise dinâmica da estrutura. Tal análise consistiu na determinação das frequências e modos de vibração da estrutura no programa de cálculo Robot Structural Analysis Professional 2010. Assim foram obtidos 10 modos de vibração como ilustrado nas figuras seguintes (Configuração estrutural inicial em azul escuro, e deformada da estrutura em azul claro).

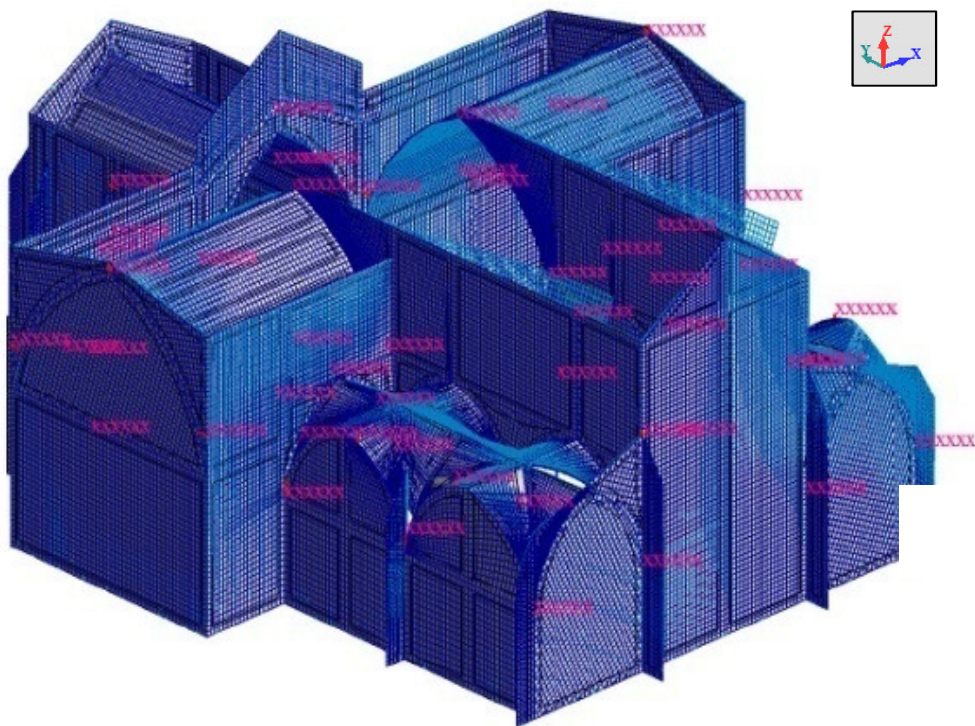


Figura 5-4 - Modo de vibração 1 ($f = 0,47$ Hz)

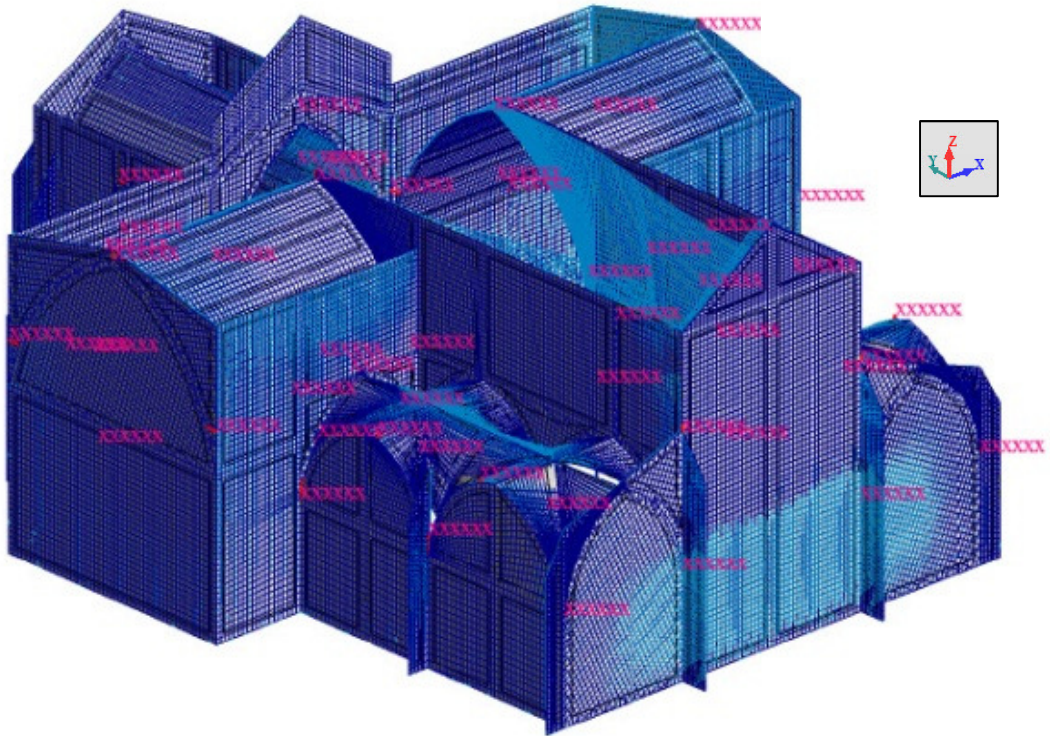


Figura 5-5 - Modo de vibração 2 ($f=4,32$ Hz)

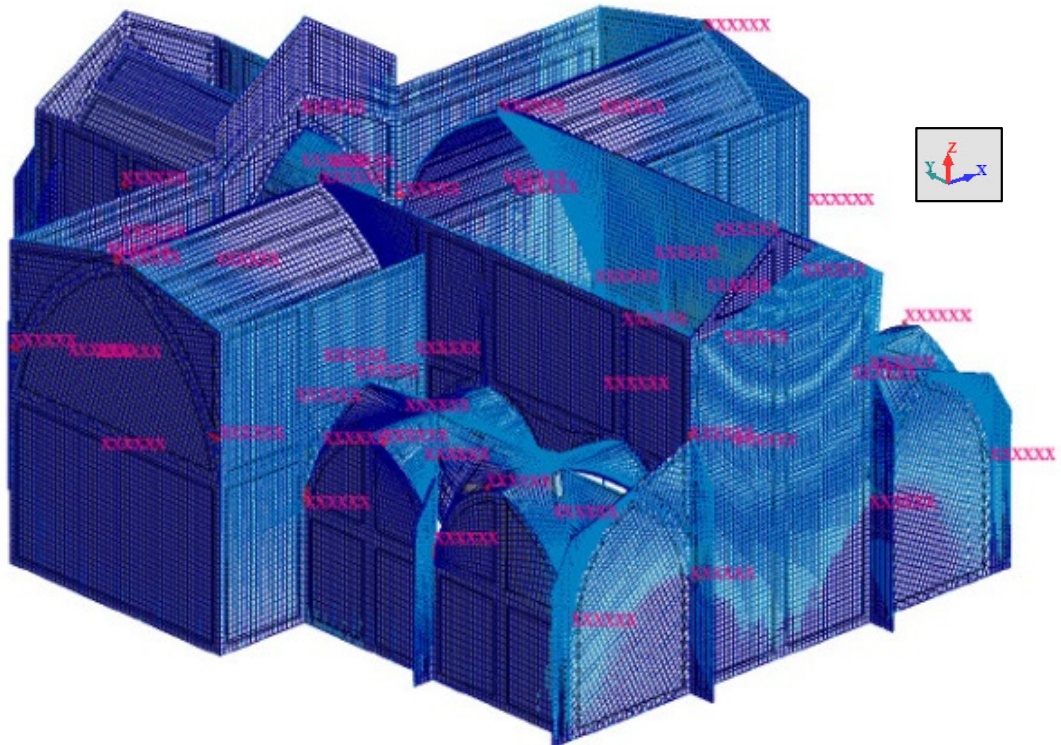


Figura 5-6 - Modo de vibração 3 ($f=9,68$ Hz)

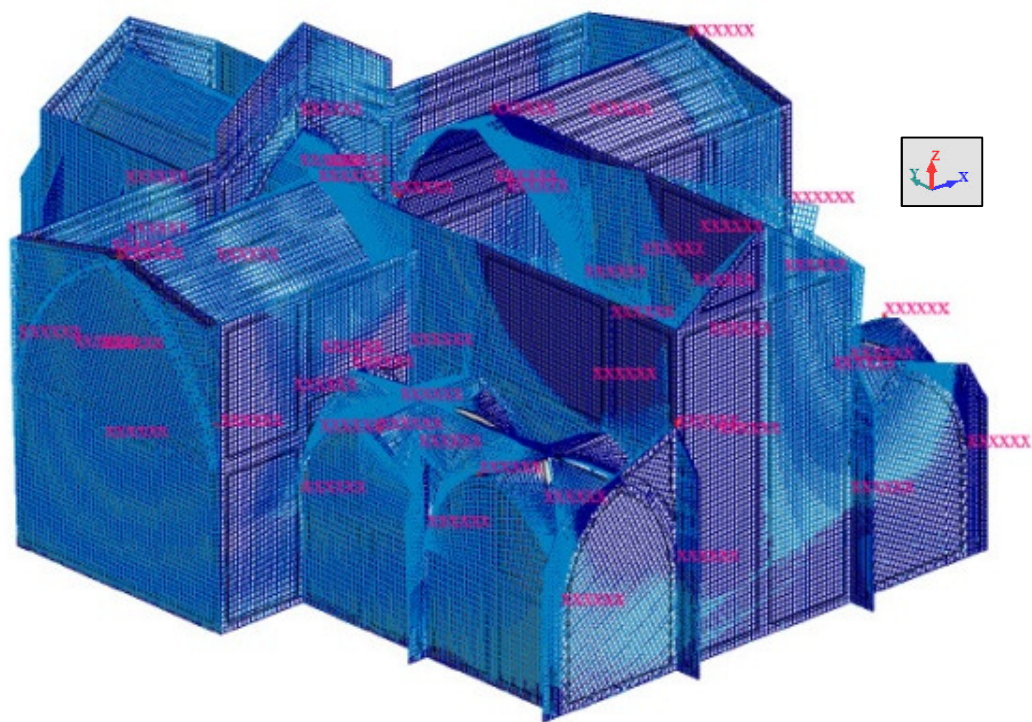


Figura 5-7 - Modo de Vibração 4 ($f=10,32$ Hz)

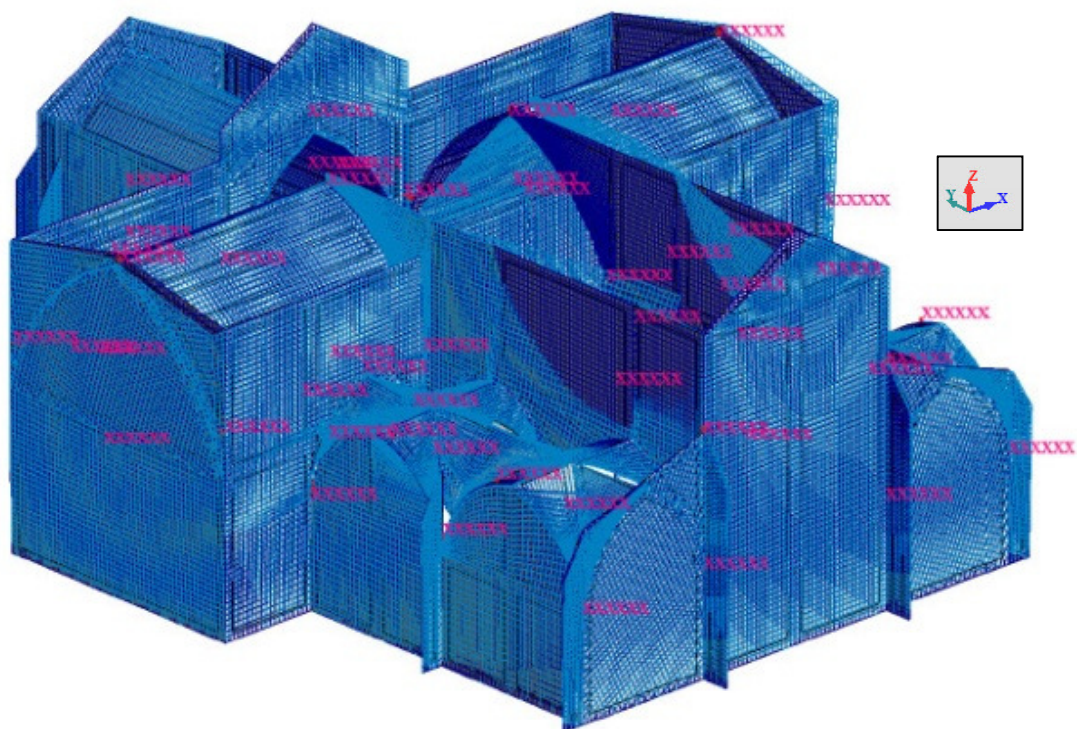


Figura 5-8 - Modo de Vibração 5 ($f=11,45$ Hz)

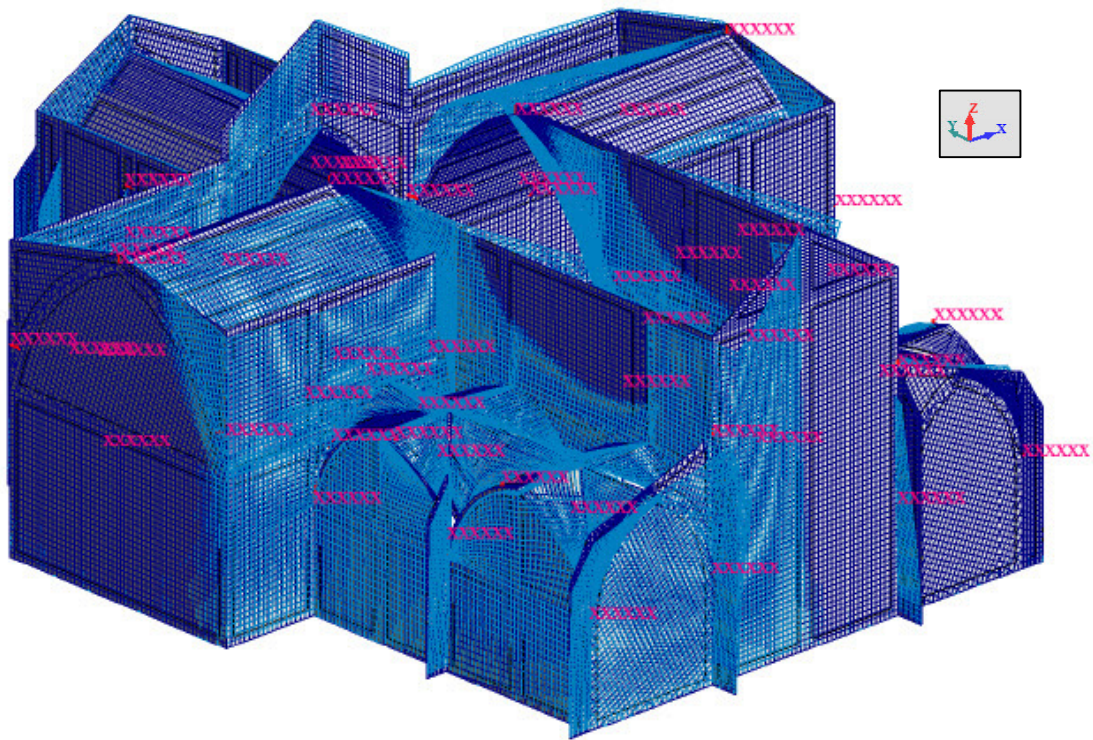


Figura 5-9 - Modo de vibração 6 ($f=13,77$ Hz)

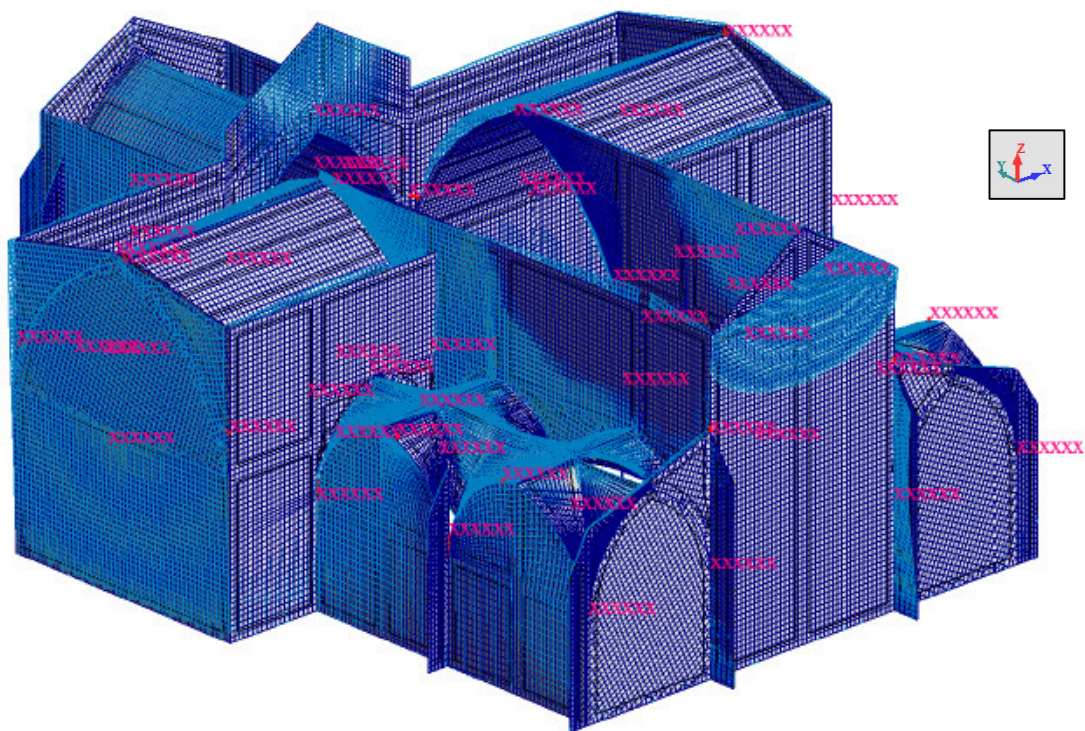


Figura 5-10 - Modo de vibração 7 ($f=16,21$ Hz)

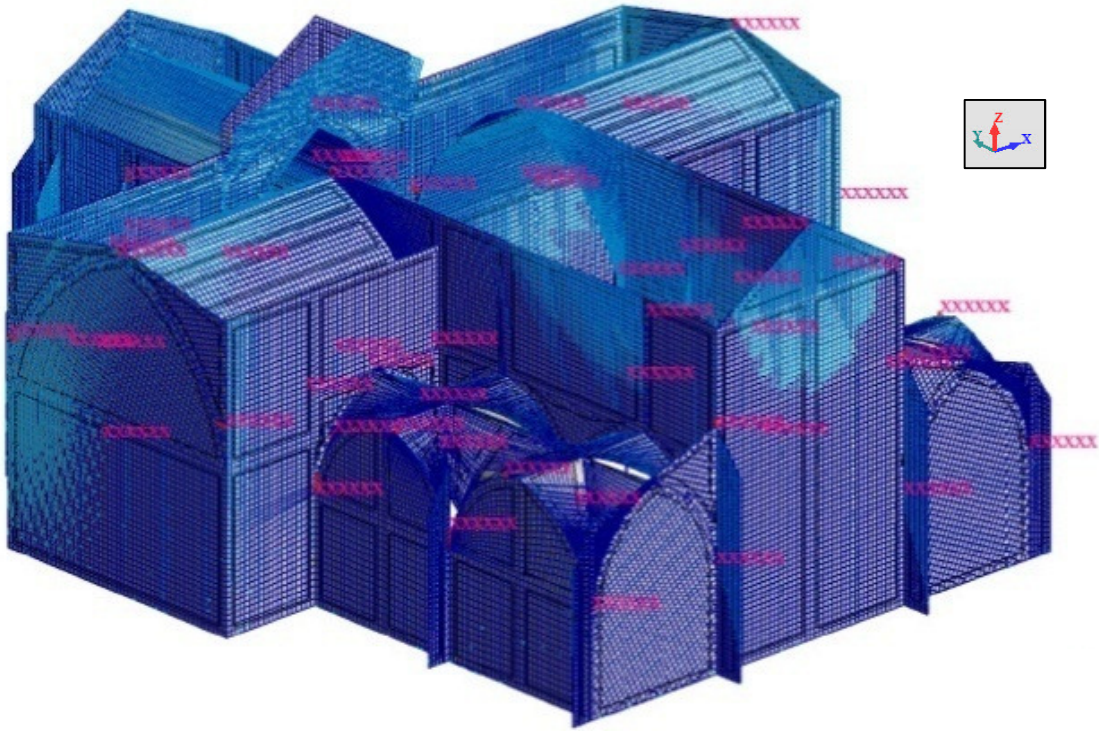


Figura 5-11 - Modo de vibração 8 ($f=16,24$ Hz)

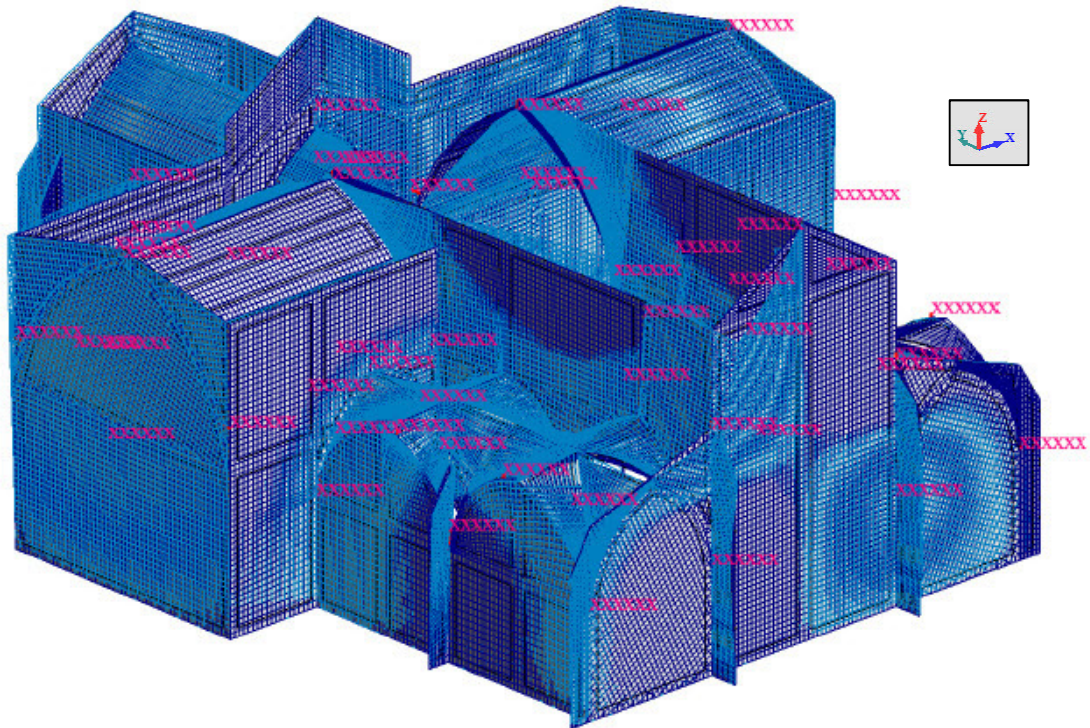


Figura 5-12 - Modo de vibração 9 ($f=16,83$ Hz)

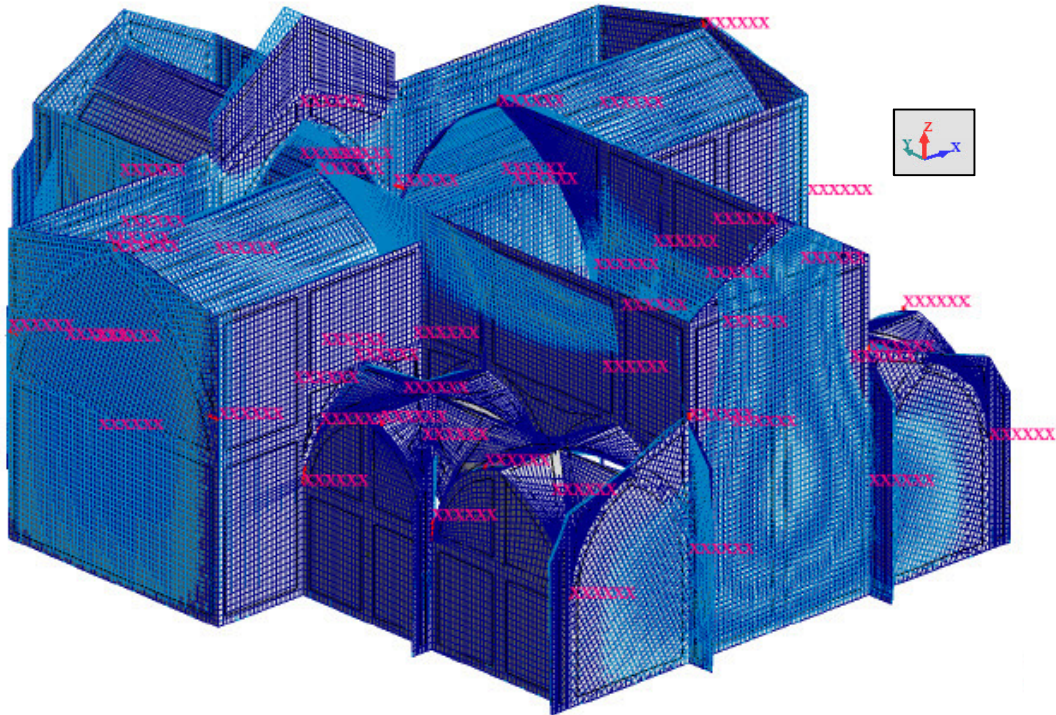


Figura 5-13 - Modo de vibração 10 (f=16,90 Hz)

Quadro 5.2 - Frequências naturais obtidas numericamente por modo de vibração

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Período (seg.)
1	0,47	2,126
2	4,32	0,231
3	9,68	0,103
4	10,32	0,096
5	11,45	0,087
6	13,77	0,073
7	16,21	0,062
8	16,24	0,062
9	16,83	0,059
10	16,90	0,059

Observando as figuras anteriores (Imagem 5.1 a 5.10) verifica-se que os primeiros modos de vibração são modos de translação preferencialmente segundo o eixo x e é nesta direcção que se verificam os maiores deslocamentos, sendo que os últimos modos traduzem-se a translações na direcção y. De salientar que o 10º modo de vibração mobiliza cerca de 78% da massa total da estrutura (3348362,02 kg).

5.3.2.3 Análise Sísmica Linear

De acordo com a acção sísmica considerada anteriormente para a zona onde se insere a estrutura, e com aceleração máxima de 1 m/s^2 , foram retirados os resultados sob a forma de tensões. Assim são apresentados nas figuras abaixo os valores da distribuição de tensões na estrutura com o intuito de localizar e identificar as zonas onde se concentram os maiores valores de tensões.

Nas seguintes figuras são apresentadas as distribuições das tensões por toda a estrutura e para as zonas onde as tensões atingem o seu valor máximo.

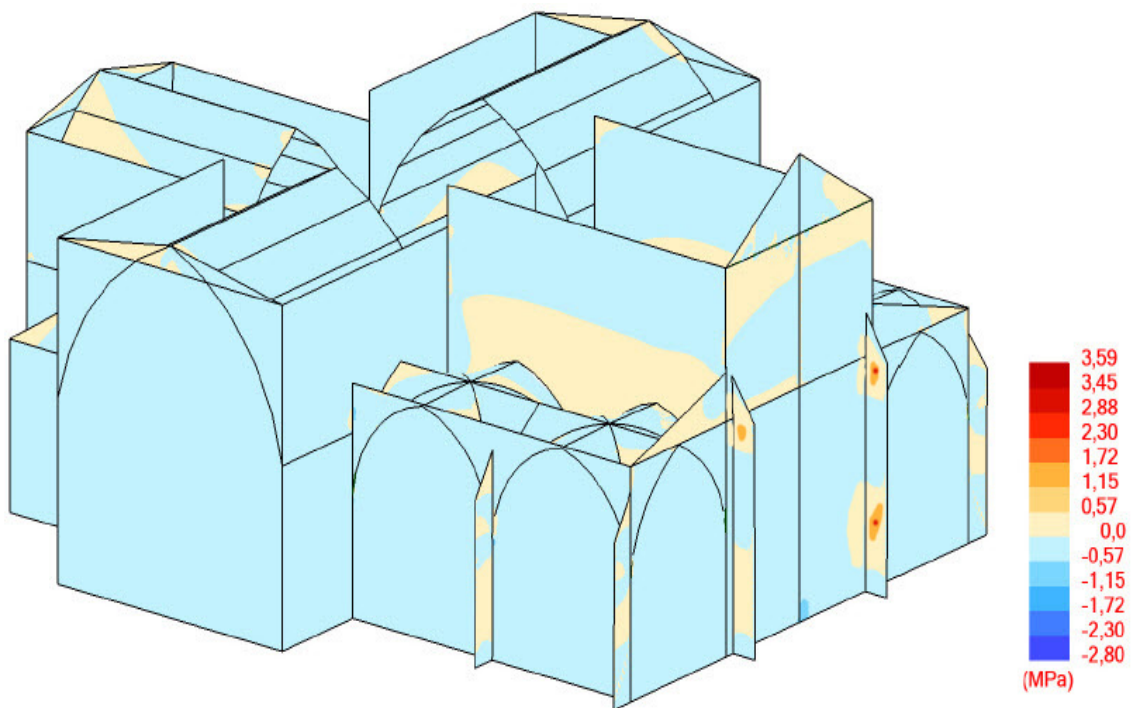


Figura 5-14 - Distribuição de tensões por toda a estrutura (1)

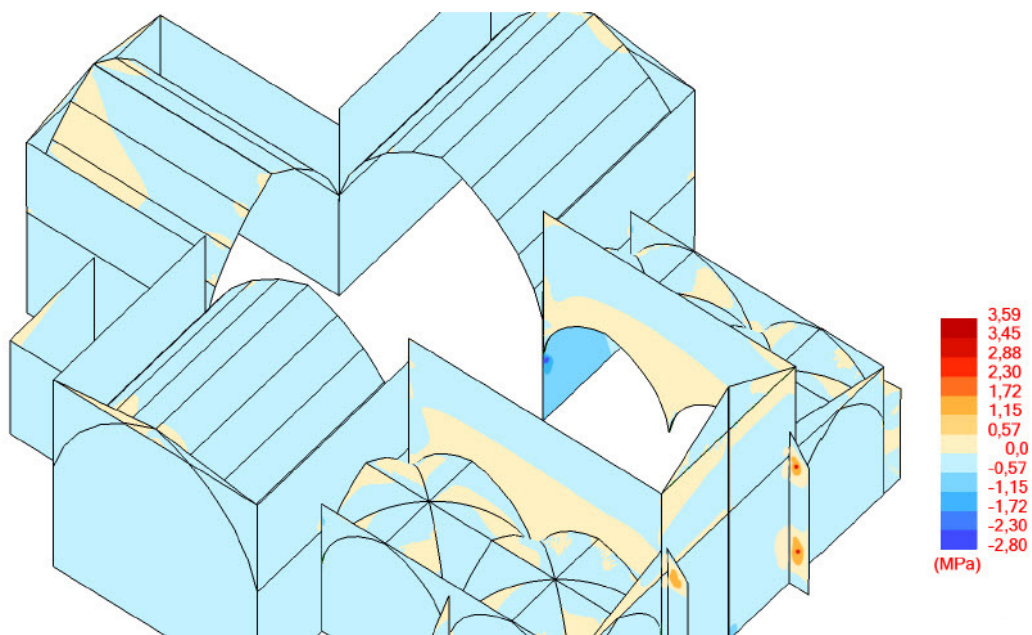


Figura 5-15 - Distribuição de tensões por toda a estrutura (2)

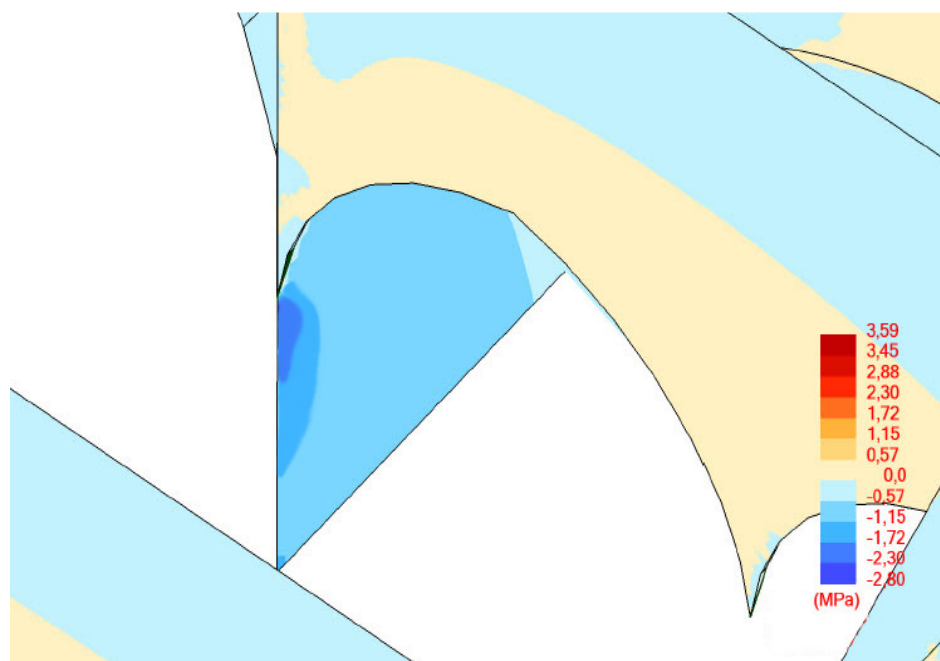


Figura 5-16 - Pormenor da distribuição de tensões na parede de apoio dos arcos

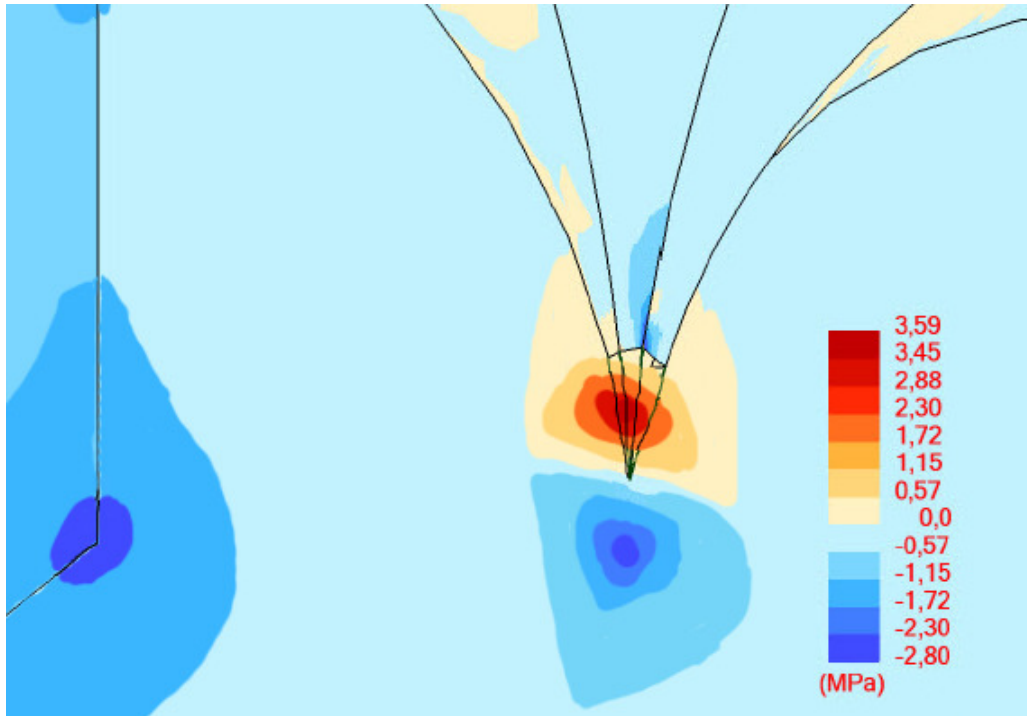


Figura 5-17 - Pormenor da distribuição de tensões na parede de apoio das abóbadas

Deste modo podemos verificar que as tensões máximas ocorrem junto às paredes de apoios dos arcos e abóbadas e nos contrafortes. Contudo verifica-se que o valor máximo ocorre nas paredes de suporte das abóbadas, apresentando valores máximos de 3,59 MPa. A nível dos contrafortes o valor máximo de tensão ronda os 3,45 MPa.

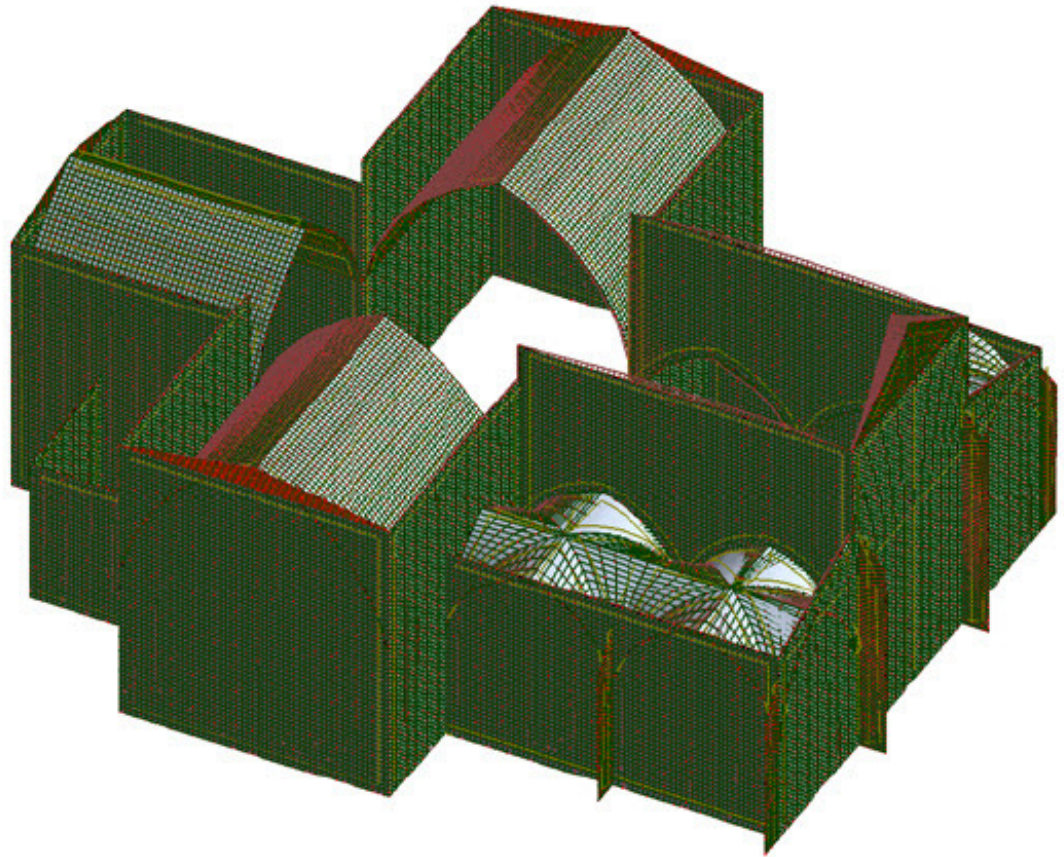


Figura 5-18 - Deformada corresponde ao máximo deslocamento

No que respeita a deslocamentos máximos, a estrutura apresenta um valor de 9,45mm de afastamento em relação à configuração inicial, sendo que este valor máximo ocorre no ponto mais alto da estrutura, correspondente à nave central do Convento.

5.4 Conclusões

Ao longo deste capítulo foram descritos e apresentados alguns resultados que se revelaram mais importantes para a análise sísmica do Convento de Santa Maria de Aguiar.

Como uma análise sísmica é precedida de uma análise dinâmica, a primeira fase consistiu em analisar as frequências e os modos de vibração da estrutura. Da realização desta fase conclui-se que os modos de vibração que excitam mais a estrutura são os que correspondem aos primeiros modos de vibração.

Da análise sísmica, os resultados apresentados mostram-nos as zonas onde predominam as maiores tensões instaladas na estrutura, sendo que estas se situam predominantemente nas paredes de suporte de arcos, abóbadas e contrafortes. Tendo como principal referência o valor das tensões de rotura da alvenaria apresentada no capítulo III (55 MPa à compressão e 3,5 Mpa à tracção), verifica-se assim que as máximas tensões encontradas no modelo ficam bastante abaixo dessas resistências. Como a estrutura do Convento não é constituída toda ela só por granito, mas sim por granito com ligantes com argamassa, a resistência global do conjunto pode assumir valores ligeiramente inferiores aos apresentados. No que concerne aos deslocamentos, verifica-se que o máximo valor ocorre na direcção longitudinal do Convento, ocorrendo este na nave central do mesmo, e é da ordem dos milímetros.

Em suma conclui-se que este tipo de análise linear apresentada para estudar o comportamento sísmico da estrutura geral do Convento apresenta resultados bastante satisfatórios, no entanto com uma análise não linear os resultados obtidos poderiam ter sido ainda mais realistas.

6 Considerações Futuras

Durante a dissertação foram apresentados e discutidos diversos temas referentes à modelação e análise de uma estrutura sacra e ao seu comportamento sísmico, no entanto torna-se necessário que estes temas e assuntos sejam desenvolvidos futuramente.

No que refere à caracterização do comportamento e características do material, visto ser uma das principais dificuldade no que respeita a uma estrutura deste tipo, poderia ser importante uma caracterização mais aprofundada do mesmo, através da realização de ensaios laboratoriais com amostras retiradas da própria estrutura (ensaios de caracterização de juntas, ensaio de tracção e corte...), ensaios *in situ* (ultra sons, medições de deformabilidade, ensaios dinâmicos...).

Em relação à modelação numérica, destaca-se a necessidade de fazer algumas melhorias a nível da malha dos elementos finitos e sua interacção entre painéis. Destacar também que seria importante haver um modelo analítico que suportasse a variação da perda de capacidade resistente do material e ligantes, bem como o desgaste provocado pelas alterações ambientais.

É importante que se realizem diversos projectos/trabalhos nesta área para que se consiga uma melhor compreensão do comportamento destas estruturas antigas, de forma a que se dote as mesmas de mecanismos resistentes para acções como as dos sismos.

7 Referencias Bibliográficas

Albuquerque, Maria (1996) - *O Mosteiro de Santa Maria de Aguiar*, 1996

Almeida, Celeste (2000) - *Análise do comportamento da Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar sob a acção dos sismos*: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000

Autocad (2010) - *Desenho assistido por computador*: Autodesk, 2010

Borges, Julio (1997) - *O Mosteiro de Santa Maria de Aguiar e os Monges de Cister*, 1997

Carta de Veneza (1931) - *Carta Internacional sobre a conservação e restauro dos monumentos e sítios*: international council of monuments and sites **ICOMOS**, 1931

Carta de Atenas (1964) - *Carta Internacional sobre a conservação e restauro dos monumentos e sítios*: international council of monuments and sites, **ICOMOS**, 1964

Coias, Vitor (2007) - *Reabilitação estrutural de edifícios antigos* : Geocorpa, Argumentum, 2007

Eurocódigo 8 (1998) - *Projecto de estruturas para resistência aos sismos*: the european committee for standardization, 1998

IGESPAR (2006) - *Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico*, 2006

LNEC (2000) - *Ensaio de mecânica das rochas na Igreja do Mosteiro da Serra*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2000

Lourenço, Paulo - *Aspectos sobre a construção em alvenaria estrutural*

Macchi G. (1992) - *Diagnostic estructural y rehabilitación de edificios histórico*: CUADERNOS INTEMAC 1992.III (7), 1992

Meli R. (1998) - *Ingenieria Estructural de los edificios Históricos*: Fundacion ICA. A.C., 1998

Mourão, Sara (2001) - *Estudo do comportamento sísmico do conjunto monumental do Mosteiro dos Jerónimo*: Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2001

Ramos, Luís (1999) - *Investigação sobre as patologias do Santuário de São Torcato*: Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 1999

Ramos, Luís e Lourenço, Paulo (1999) - *Static and Dynamics structural monitoring of the Santa Maria of Belém*: Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 1999

Ripper, Thomaz e Costa, José Paulo e Mesquita, Carlos - *Reabilitação estrutural de uma cúpula do século XVI sujeita a sério risco de ruína*

Unesco-Icomos (2003) - *Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico*: international council of monuments and sites, 2003

Vasconcelos, Graça e Lourenço, Paulo (2004) - *Experimental characterization of the compressive behaviour of granites*, 2004