



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Análise dos Efeitos do Sismo de 9 de Julho de 1998
no Património Religioso dos Açores***

Marlene da Rosa Pereira

Leiria, março de 2017



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Análise dos Efeitos do Sismo de 9 de Julho de 1998
no Património Religioso dos Açores***

Marlene da Rosa Pereira

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

Leiria, março de 2017

Agradecimentos

Nesta etapa que agora termina, várias foram as pessoas que tiveram uma grande relevância e destaque para concretização deste trabalho, este só foi possível com o apoio e cooperação destas, que contribuíram direta ou indiretamente de uma forma imprescindível para o seu resultado final, a quem, de modo algum, poderia deixar de expressar o meu agradecimento.

Assim, agradeço em especial aos Engenheiros Luis Prola e Hugo Rodrigues pela orientação, interesse e disponibilidade sempre demonstrados no decorrer da realização da dissertação, apesar da distância, tornando-se mais difícil a sua concretização, bem como a disponibilidade demonstrada pela cedência de elementos fundamentais para a sua elaboração.

Em último lugar, e não menos importante, agradeço à minha família e amigos que sempre acreditaram em mim e me incentivaram, por todo o seu incansável companheirismo, apoio, carinho e compreensão que manifestaram e pela constante ajuda prestada na elaboração do trabalho.

A todos o meu muito e sincero obrigado!

Resumo

O reforço sísmico do património religioso dos Açores é um assunto de extrema relevância para o este Arquipélago, visto que é uma Região com uma intensidade sísmica elevada, exposta frequentemente à atividade sísmica. Importa salientar também a idade avançada deste tipo de construção, nomeadamente o estado de degradação e envelhecimento dos materiais.

As técnicas de reforço têm assumido uma grande importância nesta área, com vista a melhorar o desempenho das estruturas existentes para que perante outros acontecimentos desta grandeza os prejuízos materiais e, principalmente, o número de vítimas humanas sejam reduzidos.

Visto que grande parte do Património Religioso já sofreu intervenções de reabilitação e reforço devido aos sismos ocorridos, a presente dissertação tem como principal objetivo a elaboração de uma análise do que foi feito e o estado que se encontram. Para tal estudou-se todo o processo efetuado até à execução das referidas intervenções, onde primeiramente se apresentou a atividade sísmica e a origem das ilhas deste Arquipélago, bem como uma caracterização pormenorizada do sismo de 9 de julho de 1998.

Relativamente à estrutura do Património efetuou-se uma caracterização geométrica do mesmo, do ponto de vista da sua construção, dos materiais utilizados e o comportamento sísmico, posteriormente foi elaborada uma análise dos danos ocorridos nas estruturas, associando os mesmos ao tipo de materiais utilizados. O levantamento dos respetivos danos foi efetuado de acordo com a metodologia do GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terramoti), tendo sido adicionado um novo mecanismo, o coro alto, identificado apenas pela inspeção e registo fotográfico, concluindo-se que este dano permanecia na

maioria das Igrejas afetadas.

Para finalizar foram apresentadas as técnicas de reforço empregadas nas Igrejas, bem como a avaliação da vulnerabilidade sísmica em duas das mesmas, complementando-se com uma análise crítica do resultado obtido, onde se concluiu que as Igrejas analisadas encontram-se aptas para utilização com toda a segurança relativamente ao seu comportamento sísmico.

Palavras-chave: Património Religioso, Técnicas de Reforço, Mecanismo de Dano, Comportamento Sísmico, Vulnerabilidade.

Abstract

The seismic reinforcement of the religious heritage of the Azores is a matter of extreme relevance for this Archipelago, once that it's a region with a high seismic intensity, often exposed to seismic activity. It's also important to emphasize the age and quality of this type of construction, specially the state of degradation and aging of the materials.

The reinforcement techniques have been one of the great importance in this area with a purpose to improv the performance of this structures to future events of this magnitude, material damage and, above all, the number of human victims be reduced.

Once that the most of the religious heritage has been already reabilited and reinforcement interventions due to earthquakes, the main objective of this dissertation is to analyze what has been done and the structures conditions. For that, the entire process was carried out until the execution of the above mentioned interventions, where the seismic activity and the origin of the islands of this Archipelago were presented, as well as a detailed analise of the earthquake of 9 July 1998.

A geometric characterization of structure heritage, was made, from the construction, applied materials and the seismic behavior. Afterwards was made a analysis of the damages occurred in the structures, associattion them with the type of materials used. The damage report was done according to the methodology of the GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terramoti), and a new mechanism was added, the high choir, identified only by the photographic inspection and registration, and it was concluded that this damage remained In most affected churches.

To complete, the reinforcement techniques used in the churches were presented, as well as

the evaluation of the seismic vulnerability in two of them, complemented by a critical analysis of the result obtained, where it was concluded that the churches analyzed are suitable for use with all The safety of their seismic behavior.

Key-words: Religious Heritage, Reinforcement Techniques, Damage Mechanism, Seismic Behavior, Vulnerability.

Índice de Figuras

Figura 1 - Igrejas danificadas pelo sismo de 1998 [10].	2
Figura 2 - Constituição do Arquipélago dos Açores [16].	12
Figura 3 - Imagens de destruição total do sismo de 1998 [3,24].	15
Figura 4 - Imagens de alguns danos ocorridos pelo sismo [24].	15
Figura 5 - Propagação das ondas sísmicas [17].	18
Figura 6 - Características próprias da atividade vulcânica [18].	19
Figura 7 - Localização das Placas Litosféricas [3].	19
Figura 8 - Distribuição geográfica dos centros eruptivos no arquipélago [21].	21
Figura 9 - Grupo Central e localização do epicentro do Sismo de 1998 [19].	26
Figura 10 - a) Freguesias da Ilha do Faial; b) Freguesias da Ilha do Pico.	27
Figura 11 - Carta de isossistas do sismo de 1998 na Ilha do Faial [3].	27
Figura 12 - Destruição presente na Ilha do Faial [3].	29
Figura 13 - Igreja de Nossa Senhora da Boa Nova, freguesia das Bandeiras, atingida pelo sismo de 1998 [7].	30
Figura 14 - Alguns danos provocados pelo sismo de 1998 [3].	31
Figura 15 - Igreja de Pedro Miguel e de Ribeirinha, respetivamente [21].	33
Figura 16 - Imagens da aplicabilidade Basalto [3].	37
Figura 17 - Comportamento de espécimes de pedra submetidos a ensaio de tração [26].	40
Figura 18 - Comportamento de espécimes de pedra submetidos a ensaio de compressão [26].	40
Figura 19 - Comportamento de espécimes de alvenaria submetidos a ensaio de corte [26].	40
Figura 20 - Madeira como elemento estrutural, pavimento [31].	42
Figura 21 - Orientação do fio da madeira face à carga aplicada [25].	43
Figura 22 - Telha canudo [21].	44
Figura 23 - Distribuição em planta das Igrejas [21].	44
Figura 24 - Imagens típicas das Igrejas açorianas [21].	45
Figura 25 - Esquemas de várias igrejas das Ilhas do Faial e Pico [21].	46
Figura 26 - Esquema de parede de alvenaria de duas folhas, com pedra escolhida [24].	48
Figura 27 - Imagens de alvenaria de pedra após o sismo [21].	49
Figura 28 - Parede divisória interior danificada [21].	49
Figura 29 - Pavimento utilizado no património religioso dos Açores [3].	50
Figura 30 - Exemplo de uma cobertura recuperada após o sismo e durante a recuperação [21].	51
Figura 31 - Representação esquemática de um cunhal com travamento [24].	51
Figura 32 - Imagem dos vãos utilizados no Património Religioso [21].	52
Figura 33 - Imagem do tipo de arcos no Património Religioso [21].	52
Figura 34 - Principais macro-elementos que constituem a igreja [27].	56
Figura 35 - Mecanismos de Dano [27].	58
Figura 36 - Estatística dos danos observados nas igrejas dos Açores após o sismo de 9 de Julho de 1998 [29].	60

Figura 37 - Valores obtidos na avaliação das igrejas [27].....	62
Figura 38 - Efeito da desagregação da pedra nas alvenarias de pedra [25].....	65
Figura 39 – a) Danos para fora do plano da parede; b) Danos no plano da parede [25].	65
Figura 40 - Mecanismo de rotura para fora do plano da parede [26].	66
Figura 41 - Mecanismo de derrubamento por flexão composta para fora do plano da parede [26].	66
Figura 42 - Mecanismos de colapso no plano da parede: a) Flexão composta; b) Deslizamento; c) Fendilhação diagonal [26].	67
Figura 43 - Mecanismo de deslizamento e conseqüente derrubamento no plano da parede [26]. ...	67
Figura 44 - Colapsos na estrutura [10].	68
Figura 45 - Fendas nos arcos e danos na ligação das abóbadas com o arco – Mecanismo 7.	69
Figura 46 – Interação entre cobertura e paredes laterais – Mecanismo 19.....	70
Figura 47 – Danos resultantes da interação entre torre e corpo principal da igreja, Igreja das Bandeiras [29].	71
Figura 48 - Danos nos campanários, sismo de 1998: Igreja da Feteira e Bandeiras respetivamente [29].	71
Figura 49 - Igreja e campanário da Madalena [27].	72
Figura 50 - Igreja e campanário das Bandeiras [27].....	72
Figura 51 – Seções críticas para os dois casos: a) Igreja da Madalena considerando apenas o campanário; b) Igreja da Madalena considerando a torre isolada; c) Igreja das Bandeiras considerando apenas o campanário; d) Igreja das Bandeiras considerando a torre isolada [27].....	73
Figura 52 - Danos resultantes da interação entre coro alto e paredes laterais [27].	74
Figura 53 - Fenda vertical na ligação entre as paredes e a nave, fendilhação diversa e queda de reboco [24].	74
Figura 54 - Rotura do frontão da fachada [21].	75
Figura 55 - Danos nos Arcos das Igrejas [21].	75
Figura 56 - Degradação das coberturas [21].....	76
Figura 57 - Vista geral da igreja da Madalena [31].	81
Figura 58 - Planta da Igreja da Madalena.....	82
Figura 59 – Arcos de apoio às naves laterais e central [31].	83
Figura 60 - Coro alto por cima do hall de entrada [31].	83
Figura 61 - Apoios intermédios da estrutura da cobertura [31].	84
Figura 62 - Vista geral da igreja das Bandeiras [32].	84
Figura 63 - Planta da Igreja das Bandeiras [32].	85
Figura 64 - Arcos de apoio às naves laterais e centrais [32].	86
Figura 65 - Cobertura vista do interior [32].	86
Figura 66 - Pormenor de reforço das fundações das paredes exteriores por uma fundação contínua [31].	88
Figura 67 – Pormenor de reforço de ligação dos pilares interiores por uma fundação contínua [31].	89
Figura 68 - Localização do reforço das fundações, igreja da Madalena [31].....	90
Figura 69 - Corte horizontal do pormenor de reforço das paredes com estrutura metálica, quando se encontram três panos de parede [31].	91
Figura 70 - Esquema de sobreposição da rede em aço inox [31].	91
Figura 71 - Rede de Aço Inox de reforço ao reboco [21].	92
Figura 72 - Furação de alvenarias para colocação do ligador [21].	93
Figura 73 – Corte vertical do ligador em aço inox [32].	93
Figura 74 - Corte horizontal do pormenor do ligador em aço inox [32].	93
Figura 75 - Corte horizontal do pormenor de reforço das paredes com estrutura metálica, na zona das cantarias [32].	94
Figura 76 - Pedras à vista nos arcos [21].	94

Figura 77 - Corte vertical do pormenor de reforço das paredes com estrutura metálica, na zona da parede exterior [31].	95
Figura 78 - Reforço das paredes com coroamento [21].	95
Figura 79 - Identificação do reforço dos arcos e paredes [32].	96
Figura 80 - Esquema de travamento dos arcos e paredes [32].	97
Figura 81 - Reforço metálico do travamento dos arcos interiores e paredes exteriores [21].	97
Figura 82 - Identificação dos reforços das coberturas [32].	98
Figura 83 - Reforço das coberturas no topo das paredes exteriores [32].	98
Figura 84 - Pormenor de reforço da cornija [32].	99
Figura 85 - Identificação dos reforços das coberturas [32].	99
Figura 86 - Pormenor de reforço da cobertura no topo das paredes exteriores [32].	100
Figura 87 - Cortes horizontais [32].	100
Figura 88 - Cortes horizontais [32].	101
Figura 89 - Chapa quinada de ligação entre diagonais [32].	101
Figura 90 - Reforço da fundação das torres [31].	102
Figura 91 - Reforço do piso das torres [31].	103
Figura 92 - Amarração em aço inox dos tirantes de travamento [21].	103
Figura 93 - Reforço da peça decorativa no topo das torres [31].	103
Figura 94 - Ligação do frontispício à torre [21].	104
Figura 95 - Parte do Alçado frontal com a localização do reforço [31].	104
Figura 96 - Corte horizontal do Reforço do Frontispício [31].	105
Figura 97 - Pormenor de fixação no reforço do frontispício [31].	105
Figura 98 - Pináculo das torres [32].	106
Figura 99 - Corte horizontal [32].	106
Figura 100 - Patologia relacionada com a humidade.	107
Figura 101 - Valores obtidos na avaliação das igrejas antes da aplicação das técnicas de reforço.	108
Figura 102 - Valores obtidos na avaliação das igrejas após a aplicação das técnicas de reforço.	110
Figura 103 - Comparação dos resultados obtidos antes e após a aplicação das técnicas de reforço.	111

Índice de Quadros

Tabela 1 - Características das Ilhas dos Açores [3,22].....	13
Tabela 2 - Sismos de intensidade superior a VII, ocorridos no Arquipélago dos Açores [13].	23
Tabela 3 - Classificação dos danos ocorridos no Património religioso das Ilhas do Faial e Pico [21].	34
Tabela 4 - Recursos Geológicos e a sua aplicabilidade [3].	38
Tabela 5 - Caraterísticas mecânicas da pedra basáltica [30].	39
Tabela 6 - Tipos de argamassas [3].	41
Tabela 7 - propriedades mecânicas do Pinho Bravo [13].	43
Tabela 8 - Características Mecânicas - Aço Inox [31].	92

Lista de Siglas

GNDT	Grupo Nazionale per la Difesa dai Terramoti
LREC	Laboratório Regional de Engenharia Civil
C_u	Coesão
\emptyset	Ângulo de atrito interno
σ	Tensão normal de compressão
τ	Tensão tangencial máxima admissível da alvenaria
I_d	Índice de dano
I_v	Índice de vulnerabilidade
I_s	Índice de segurança
V_{kp}	Soluções construtivas que atenuam o aparecimento de mecanismo
V_{ki}	Situações construtivas que favorecem a ativação do mecanismo
ρ_k	Importância atribuída ao mecanismo
d_k	Nível de dano do mecanismo
γ_1	Fator de importância da igreja;
S	Fator amplificador do solo para a zona sísmica em análise;
a_{gr}	Aceleração de referência do solo para a zona sísmica em análise;
a_{ELU}	Aceleração do solo em relação ao estado limite último, pela expressão

Índice

DEDICATÓRIA	I
ANÁLISE DOS EFEITOS DO SISMO DE 9 DE JULHO DE 1998 NO PATRIMÓNIO RELIGIOSO DOS AÇORES	I
ANÁLISE DOS EFEITOS DO SISMO DE 9 DE JULHO DE 1998 NO PATRIMÓNIO RELIGIOSO DOS AÇORES	III
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE QUADROS	XVII
LISTA DE SIGLAS	XIX
ÍNDICE	XXI
INTRODUÇÃO	1
1.1. ÂMBITO	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
ESTADO DA ARTE	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. SISMOLOGIA NO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES	5
2.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA RELACIONADA COM O PATRIMÓNIO RELIGIOSO	6
2.4. CONCLUSÃO	10
ENQUADRAMENTO GERAL	11
3.1. INTRODUÇÃO	11
3.2. CARATERIZAÇÃO SOCIAL	11
3.3. CARATERIZAÇÃO SISMOLÓGICA	13
3.4. SISMOS RECENTES, EM PARTICULAR O SISMO DE 1998	14
3.5. CONCLUSÃO	15
CARACTERIZAÇÃO DA SISMOLOGIA NO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES	17
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	17
4.2. ORIGEM DE UM SISMO	17
4.3. SISMOS NOS AÇORES	20

4.3.1. PRINCIPAIS SISMOS OCORRIDOS	22
4.4. CONCLUSÃO	24
SISMO DE 9 DE JULHO DE 1998	26
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	26
5.2. DANOS PROVOCADOS PELO SISMO	28
5.3. CONCLUSÃO	32
CARACTERIZAÇÃO CONSTRUTIVA DO PATRIMÓNIO RELIGIOSO	33
6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	33
6.2 MATERIAIS PREDOMINANTES UTILIZADOS NA SUA CONSTRUÇÃO	35
6.2.1. PEDRA	36
6.2.2. ARGAMASSAS	41
6.2.3. MADEIRA	41
6.2.4. TELHAS REGIONAIS	43
6.3. SISTEMAS CONSTRUTIVOS	44
6.3.1. FUNDAÇÕES	46
6.3.2. PAREDES EXTERIORES	47
6.3.3. PAREDES DIVISÓRIAS INTERIORES	49
6.3.4. PAREDES MESTRAS INTERIORES	50
6.3.5. PAVIMENTOS	50
6.3.6. COBERTURA	50
6.3.7. CUNHAIS	51
6.3.8. VÃOS	52
6.3.9. ARCOS	52
6.4. CONCLUSÃO	53
ANÁLISE DOS DANOS OCORRIDOS NAS IGREJAS	55
7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	55
7.2. INSPEÇÃO, REGISTO E AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE	56
7.2.1. FICHA DE LEVANTAMENTO DE DANO E AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS IGREJAS	58
7.2.1.1. <i>Cálculo do índice de dano, índice de vulnerabilidade e índice de segurança</i>	60
7.3. COMPORTAMENTO SÍSMICO E MECANISMOS DE DANO MAIS FREQUENTES OCORRIDOS NO PATRIMÓNIO RELIGIOSO APÓS O SISMO DE 1998	63
7.3.1. ALVENARIA ESTRUTURAL DE PEDRA (MECANISMO 1, 2, 3, 4)	63
7.3.2. NAVE (MECANISMOS 5, 6, 7, 8, 9)	68
7.3.3. COBERTURA (MECANISMO 19)	69
7.3.4. TORRES E CAMPANÁRIOS (MECANISMO 27 E 28)	70
7.3.5. CORO ALTO (MECANISMO 29)	73
7.3.6. OUTROS DANOS	74
7.4. CONCLUSÃO	76
TÉCNICAS DE REFORÇO EMPREGADAS EM DUAS IGREJAS E RESPECTIVO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE	79
8.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	79
8.2. DESCRIÇÃO DA IGREJA DA MADALENA E BANDEIRAS	80
8.2.1. IGREJA DA MADALENA	80
8.2.2. IGREJA DAS BANDEIRAS	84
8.3. SOLUÇÕES DE REFORÇO EFETUADAS	87

8.3.1. REFORÇO DAS FUNDAÇÕES	88
8.3.2. REFORÇO DAS PAREDES.....	90
i. <i>Reforço entre três panos de parede</i>	91
ii. <i>Reforço na zona das cantarias</i>	94
iii. <i>Reforço na zona da parede exterior</i>	95
8.3.3. REFORÇO DE ARCOS E COBERTURAS	96
i. <i>Travamento dos arcos e paredes</i>	96
ii. <i>Reforço das coberturas no topo das paredes exteriores perpendiculares aos barrotes da cobertura</i> 98	
iii. <i>Reforço das coberturas, no topo das paredes exteriores paralelas aos barrotes da cobertura</i>	99
iv. <i>Ligação das empenas paralelas às vigas da cobertura</i>	100
8.3.4. REFORÇO DAS TORRES SINEIRAS.....	101
i. <i>Reforço da Fundação das Torres</i>	101
ii. <i>Reforço do Piso das Torres</i>	102
iii. <i>Reforço da peça decorativa no topo das torres</i>	103
iv. <i>Reforço do Frontispício</i>	104
8.3.5. REFORÇO DOS PINÁCULOS	105
8.4. ESTADO DE CONSERVAÇÃO ATUAL	106
8.5. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA, IGREJAS DA MADALENA E BANDEIRAS	107
8.5.1. VULNERABILIDADE SÍSMICA, IGREJAS DA MADALENA E BANDEIRAS PRÉ-REFORÇO	108
8.5.2. VULNERABILIDADE SÍSMICA APÓS A APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REFORÇO, IGREJAS DA MADALENA E BANDEIRAS ..	109
8.5.3. ANÁLISE DO ANTES E APÓS DA APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REFORÇO NO RESULTADO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA	111
8.6. CONCLUSÃO	112
CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	114
BIBLIOGRAFIA	118
ANEXOS	122
ANEXO I	123
CÁLCULO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA – IGREJA DAS BANDEIRAS	123
ANEXO II	132
CÁLCULO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA – IGREJA DA MADALENA	132

Introdução

1.1. Âmbito

A presente dissertação surge no âmbito da naturalidade da autora e das suas preocupações em relação ao comportamento sísmico das construções da Região dos Açores, visto que esta é uma Região exposta frequentemente a atividade sísmica. Embora não seja possível prever quando e onde os sismos ocorrerão, é possível identificar as regiões com uma maior suscetibilidade.

A engenharia é um instrumento fundamental, nomeadamente em relação às soluções que esta apresenta nas técnicas de construção, na tentativa de mitigar os efeitos materiais e vítimas que um sismo pode causar. Deste modo existe uma preocupação da população e das entidades com tais fenómenos, procurando reduzir os seus efeitos, especialmente procedendo-se ao melhoramento da construção.

As técnicas de reabilitação e reforço têm assumido uma grande importância nesta área, com vista a melhorar o desempenho das estruturas existentes para que perante outros acontecimentos desta grandeza os prejuízos materiais e, principalmente, o número de vítimas humanas sejam reduzidos. Tendo sido extremamente relevante na respetiva Região devido ao Sismo de 9 de julho de 1998, objeto de estudo no presente trabalho, com uma maior incidência no Grupo Central, particularmente nas Ilhas do Faial e Pico. Interessa sobretudo perceber como as respetivas técnicas de reabilitação foram executadas no património religioso dos Açores, assim como avaliar a sua eficácia perante a ocorrência de novos sismos.

Em muitas situações a falta de interesse em prevenir faz com que ao património religioso não seja dada a devida atenção, entrando assim em degradação total, tornando-se numa perda de elevado valor para a sociedade, visto que representa parte de nós, da nossa cultura e tradições

que devem ser sempre valorizadas. Do ponto de vista estético torna-se também numa situação desagradável, pois se as estruturas não forem conservadas transmitem uma má imagem da Região onde se encontram, assim como a ocupação do espaço onde estão inseridas.

O Património Religioso dos Açores foi um tipo de construção muito afetada pelos sucessivos abalos sísmicos que surgiram ao longo dos anos, devido ao estado de degradação e envelhecimento dos materiais, e idade avançada deste tipo de construção, como se pode observar nos exemplos ilustrados pela Figura 1. Perante tal situação, ao longo dos anos as respetivas Igrejas foram sofrendo diversas intervenções de reabilitação, devido aos abalos de maior intensidade que fizeram com que estas ficassem impróprias para utilização na maioria dos casos, nomeadamente o Sismo de 9 de julho de 1998.



Figura 1 - Igrejas danificadas pelo sismo de 1998 [10].

Um aspeto essencial ao realizar um estudo desta natureza é estabelecer uma ligação com o contexto Açoriano, de forma a enquadrar a sua localização, natureza e história. Pois é necessário compreender as limitações da condição humana, os aspetos físicos, culturais e psicológicos que caracterizam os habitantes do arquipélago, e que lhes são inerentes e influem nas abordagens que são dadas na prevenção e nas medidas de mitigação de danos.

Existem variados desastres naturais a que estas ilhas estão sujeitas, desde abalos sísmicos, erupções vulcânicas, cheias, grandes maresias e ventos [3]. No entanto foram de alguns destes fenómenos que se geraram estas Ilhas, que apesar de nos dias de hoje terem condições de continuar a crescer, correm sempre um elevado risco devido à ocorrência de catástrofes naturais.

No presente trabalho analisa-se a importância destas técnicas de reabilitação, avaliando-se a sua relevância na perseveração do património construído, tendo-se em conta, a natureza destas

ilhas, do ponto de vista da sua evolução, a partir de eventos vulcânicos, assim como dos seus recursos naturais e tradicionais que durante anos fizeram parte da construção das suas estruturas.

1.2. Objetivos

Visto que grande parte do Património Religioso já sofreu intervenções de reabilitação e reforço devido aos sismos ocorridos, a presente dissertação tem como principal objetivo a elaboração de uma análise do que foi feito e o estado que se encontram. Pretende-se estudar todo o processo efetuado até à execução das referidas intervenções, através de um estudo dos danos ocorridos nas estruturas, associando os mesmos ao tipo de materiais utilizados. Neste contexto torna-se necessário a caracterização construtiva do património na época da sua construção, assim como a análise do seu comportamento sísmico face aos dias de hoje, visto que neste tipo de estruturas não existem estudos sistemáticos das variadas técnicas de reabilitação e reforço aplicadas.

Perante tal situação torna-se importante reunir e sintetizar a informação relacionada com a sismologia nos Açores e, especificamente com o sismo de 9 de julho de 1998, desde a localização do epicentro, direção predominante, intensidade e magnitude até ao nível de destruição verificado, de forma a perceber os danos ocorridos e as técnicas de reabilitação empregadas. Assim como compreender a origem da atividade sísmica nos Açores e o tipo de construção mais comum neste género de estruturas.

Após a análise de toda a informação recolhida será possível caracterizar a capacidade de destruição do sismo e as técnicas de reabilitação que foram aplicadas, estabelecendo-se uma relação causa-efeito. Para tal realizar-se-á um estudo às igrejas danificadas pelo respetivo sismo de modo a verificar se, presentemente, os projetos de reabilitação foram efetuados tendo em conta as preocupações de segurança anti-sísmica e perceber quais as técnicas que melhor se adaptam à realidade do património religioso dos Açores.

1.3. Organização do Trabalho

A dissertação será desenvolvida em nove capítulos. O Capítulo 1 tem um carácter introdutório onde estão definidos o âmbito, os objetivos e a metodologia do trabalho a desenvolver.

O Capítulo 2 tem como objetivo dar um enquadramento do tema em análise, descrevendo-se a evolução do arquipélago dos Açores.

De seguida, no Capítulo 3, é efetuado um levantamento de informação relacionada com o tema a desenvolver na presente dissertação, por meio da revisão bibliográfica relevante sobre o assunto.

No Capítulo 4 caracteriza-se a sismologia nos Açores, apresentando-se a sua atividade sísmica e a origem das ilhas que compõem o Arquipélago. Descreve-se a razão pela qual esta Região é afetada, de uma forma significativa por este tipo de eventos, suas origens, uma apresentação dos sismos mais relevantes que ocorreram esta zona nas últimas décadas e a escala com que estes são classificados.

A caracterização pormenorizada do sismo de 9 de julho de 1998 ocorrido nos Açores é feita no Capítulo 5, com um breve enquadramento das ilhas onde ocorreu.

No Capítulo 6 é elaborada uma caracterização geométrica das Igrejas, do ponto de vista da sua construção, dos materiais utilizados e comportamento sísmico das mesmas, enquanto no Capítulo 7 faz-se o levantamento e a análise dos danos ocorridos nas igrejas, associando os mesmos aos processos construtivos e materiais utilizados na sua construção.

No Capítulo 8 são apresentadas as técnicas de reforço empregadas nas Igrejas danificadas, mencionadas e descritas no Capítulo 6, bem como a avaliação da vulnerabilidade sísmica em duas das mesmas. Complementa-se este capítulo com uma análise crítica das intervenções efetuadas e do resultado obtido.

Por fim no Capítulo 9 são feitas as principais conclusões e considerações finais, de acordo com toda a informação e conhecimento apreendido ao longo da presente dissertação, assim como sugestões para desenvolvimentos futuros após a respetiva análise.

Estado da Arte

2.1. Introdução

No presente trabalho pretende-se relacionar os danos ocorridos no Património Religioso com o tipo de construção e os materiais utilizados na sua execução, associando os mesmos com as técnicas de reabilitação e reforço aplicadas na intervenção do respetivo património.

Ao longo dos anos, após o sismo de 9 de julho de 1998 no Arquipélago dos Açores, foram efetuados variados estudos relevantes, nomeadamente relacionados com os danos estruturais e as técnicas de reabilitação empregadas. Estes estudos foram baseados essencialmente em análises sísmicas com o intuito de propor as medidas de reabilitação mais adequadas para as intervenções a efetuar nas estruturas.

Posteriormente passam-se apresentar variados estudos efetuados relacionados com o trabalho que se pretende apresentar ao longo de toda a dissertação.

2.2. Sismologia no Arquipélago dos Açores

A sismologia é um aspeto essencial no Arquipélago dos Açores, devido à sua atividade permanente, daí haver um elevado cuidado em analisar e perceber toda a sua envolvência, de modo a que se consiga prevenir, ou na medida do possível, mitigar, todas as suas consequências.

Na busca de informações sobre terremotos encontra-se em 2005, um trabalho de Bezzeghoud et al [6], que realizaram um estudo dos mecanismos focais dos sismos de 1980, 1997 e 1998 na região dos Açores com recurso à Rede Global Sismógrafo Digital. Encontraram uma

solução preliminar no plano de falha, obtida a partir do primeiro movimento das ondas do corpo, profundidade de inversão, momento sísmico escalar e do plano de falha de orientação. Esta metodologia permitiu verificar a existência de mecanismos semelhantes nos sismos de 1980 e 1998, assim como a observação de dois tipos de comportamento ao longo de toda a região.

No ano seguinte, Nunes et al [12] apresentaram e interpretaram dados gravimétricos recentemente obtidos na Ilha do Pico. Estes foram correlacionados com características morfo-tectónicas e vulcânicas identificadas durante o trabalho de campo, esperando assim que estes contribuíssem para uma melhor avaliação de riscos vulcânicos da Ilha do Pico. Em primeiro lugar executaram um estudo geológico, de seguida uma análise sismo-tectónica, e por fim uma análise dos dados gravimétricos e anomalias.

Também Maria Rodrigues [15], realizou um estudo acerca da sismicidade na Região dos Açores, com o intuito de perceber se esta se distribui de forma uniforme ao longo do ano, ou se, em algumas épocas se regista um número de ocorrências sísmicas significativamente maior do que noutras. Esta análise foi efetuada para sismos de qualquer magnitude, e por fim, para sismos de fraca, média e forte magnitude. Após a análise dos resultados constatou que a ocorrência de sismos em algumas épocas do ano é mais provável do que noutras. No entanto quando a magnitude dos sismos aumenta, esta variação diminui.

Logo após a ocorrência do sismo de 1998, em 1999, Nunes et al [13], fizeram um estudo relacionado com os principais sismos destrutivos no Arquipélago dos Açores, através de uma abordagem criteriosa e exaustiva dos sismos mais catastróficos que afetaram o arquipélago, baseado na imprensa diária e não-diária, em artigos de divulgação e em publicações diversas relacionadas com os principais sismos nos Açores, de natureza tectónica, associados às principais estruturas existentes na região.

2.3. Informação Técnica relacionada com o Património Religioso

Do ponto de vista técnico, foram efetuados também alguns estudos, nomeadamente relacionados com análise sísmica do património religioso muito afetado pelo sismo de 9 de julho. As respetivas análises tiveram como principal objetivo a escolha das técnicas de

reabilitação mais adequadas a cada situação, pois só assim se consegue observar de uma forma mais real o comportamento das estruturas face à ocorrência de um sismo.

Em 1999, Pedrosa et al [14], efetuaram um estudo exaustivo da Igreja de S. Francisco da Horta após a ocorrência do sismo de 1998. Para tal realizaram uma análise da legislação em vigor, de forma a proceder-se da melhor forma possível na intervenção da Igreja. De seguida fizeram um levantamento do estado da Igreja com recurso à inspeção visual e ensaios e por último uma modelação numérica da estrutura. Após todo este procedimento e análise de todos os resultados obtidos, seleccionaram as medidas corretivas a aplicar na Igreja, tendo em conta a eficácia, durabilidade, compatibilidade e conservação do património arquitetónico existente.

Também em 1999, foi executado um levantamento dos danos verificados em Igrejas durante o sismo dos Açores de Julho de 1998. Este levantamento foi executado por Guerreiro et al [5], baseando-se em informação recolhida no local por uma missão de estudo, sendo observadas trinta Igrejas. Na observação destas registaram todos os tipos de danos observados, dando especial atenção à análise de potenciais mecanismos de colapso, assim como todas as intervenções de reforço e reabilitação realizadas anteriormente nas respetivas igrejas. Após a recolha de toda a informação desenvolveram um estudo com o intuito de identificar e compreender os possíveis mecanismos de colapso.

Ainda em 1999, Neves et al [9, 11], realizaram uma análise sísmica da Igreja da Madalena e das Bandeiras, na Ilha do Pico, em que o mesmo procedimento adotado para as duas Igrejas. Este consistiu numa descrição da estrutura e dos danos observados, uma análise numérica e dos resultados obtidos, e por fim propuseram algumas soluções de reforço estrutural, com base na análise efetuada, sempre com o compromisso de não interferir com o conceito original do edifício e a necessidade de assegurar exigências de segurança.

Em 2004, Magalhães et al [7], fizeram uma avaliação da vulnerabilidade sísmica de igrejas da Ilha do Faial e Pico, com base na metodologia apresentada pelo “Grupo Nazionale per la Difesa dai Terramoti” de Itália. Esta metodologia identificou 28 mecanismos de dano associados ao comportamento dos diferentes macro-elementos que constituem as igrejas perante a ação sísmica. Este estudo foi aplicado em 16 igrejas das Ilhas atingidas pelo sismo de 9 de julho de 1998.

Arêde et al [1], em 2005 abordaram várias técnicas de reforço propostas para a reabilitação de edifícios danificados pelo sismo de 1998 na Ilha do Faial, no entanto para que estas técnicas fossem as mais adequadas tornou-se necessário um conhecimento das características dos materiais e a realização de uma análise numérica do comportamento sísmico das estruturas em causa. Foram executados vários estudos numéricos, e da análise dos resultados obtidos propuseram as técnicas de reforço.

Em 2007, Arêde et al [2], executaram uma descrição geral de dois tipos de ensaios realizados: (i) parede de alvenaria de blocos de betão confinada e (ii) em habitações tradicionais, onde focaram a sua atenção particularmente nos objetivos e em alguns resultados gerais mais representativos da resposta observada. Estes ensaios tiveram como intuito a obtenção de resultados experimentais aptos a uma representação credível da resposta estrutural de paredes de alvenaria de pedra tradicional e de alvenaria confinada de blocos conforme a realidade atual nesta Região.

Ainda em 2007, Costa et al [4] realizaram um enquadramento das soluções estruturais adotadas pelos vários gabinetes de projeto responsáveis pelas reabilitações dos edifícios habitacionais na ilha do Faial, para que perante a ocorrência de um novo sismo as estruturas estivessem preparadas. Para tal analisaram aspetos arquitetónicos e os projetos de execução elaborados pelos vários gabinetes intervenientes.

Em 2008, Oliveira et al [21], elaboraram uma compilação de trabalhos realizados devido ao sismo, num livro intitulado por “Sismo 1998 – Açores, Uma Década Depois [21]”. Estudaram, analisaram e interpretaram trabalhos de intervenção no parque edificado atingido pelo sismo de 1998. Para tal efetuaram um levantamento das obras realizadas e posteriormente tratamento dos dados adquiridos. Com a informação recolhida, e posteriormente tratada, construiu-se um espólio de grande valor para a conservação da memória do que se passou e compreender se a estratégia política desenvolvida pelas autoridades públicas. O respetivo livro, permitiu reunir num só documento toda a informação relevante recolhida e tratada acerca do sismo de 1998 e também relacionada com outros eventos sísmicos marcados na história do Arquipélago dos Açores, visto que foram efetuados estudos exaustivos acerca dos mesmos. Apresenta informação relevante direcionada: (i) à caracterização sísmica nos Açores, do ponto de vista geológico, geofísico e histórico; (ii) aos danos ocorridos; (iii) aos estudos desenvolvidos; (iv) ao processo de reconstrução; e (v)

algumas considerações finais. No entanto em relação às medidas de reforço aplicadas e a sua eficácia no património religioso danificado pelo sismo há alguma carência de informação. Este fato reforça o interesse em realizar o estudo na presente dissertação de mestrado.

No âmbito da sua Dissertação de Mestrado, em 2009, Nilsa Martins [8], realizou uma análise de soluções de reforço usadas na reabilitação da Ilha do Faial devido ao sismo de 9 de julho de 1998. Foi efetuada uma análise numérica de duas habitações, uma urbana e outra rural, com o objetivo de compreender o seu desempenho, antes e depois do reforço, quando solicitadas por um sismo, e o respetivo efeito da altura no comportamento das estruturas.

Também em 2010, Francisco Câmara [3], na sua dissertação de Mestrado, realizou um estudo acerca da evolução das soluções de reabilitação recente nos Açores motivada pela atividade sísmica. Neste estudo descreveu a construção tradicional e as patologias ocorridas pelas atividades sísmicas de 1980 e 1998, assim como uma apresentação e discussão das técnicas empregadas na reabilitação dos edifícios danificados pelos sismos.

Mais recentemente, em 2011, Neves et al [10], fizeram um estudo relacionado com os edifícios antigos na ilha do Faial, baseando-se na sua caracterização detalhada, na classificação aprofundada dos danos e dos seus mecanismos de colapso e por fim uma avaliação da vulnerabilidade sísmica dos mesmos. Devido aos danos causados pelo sismo estas construções sofreram modificações e reforço para melhorar o seu comportamento face à ação sísmica.

Ainda em 2011, foi efetuado um estudo relacionado com o sismo ocorrido em Itália de 2009, por Cimellaro et al [28], que destacou a vulnerabilidade sísmica da construção de alvenaria histórica devido ao reforço impróprio efetuado nos últimos 50 anos. O respetivo sismo revelou inúmeras limitações das intervenções aplicadas, devido às incompatibilidades geradas entre as mesmas e o existente. Com este estudo discutiram-se também questões técnicas referentes ao reforço sísmico da basílica de Santa Maria di Collemaggio, em particular as ações incorretas e a escolha de técnicas impróprias aplicadas anteriormente. Foram também apresentados os danos ocorridos pelo referido sismo.

2.4. Conclusão

Após a pesquisa bibliográfica efetuada constatou-se quem em relação à análise sísmica do Património Religioso existem muitos estudos efetuados logo após a ocorrência do sismo, pois para as intervenções realizadas este era um passo fundamental para que as mesmas fossem aplicadas da melhor forma possível.

Do ponto de vista técnico foram também efetuados vários levantamentos relacionados com o estado do Património após a ocorrência do sismo com recurso a várias metodologias, algumas mais complexas que permitiram identificar vários mecanismos de colapso e outras mais simples recorrendo apenas à visualização dos danos.

Em relação aos processos construtivos e materiais utilizados no respetivo património deparou-se com uma escassez de informação, pois os respetivos processos e materiais eram utilizados consoante a cultura e recursos disponíveis na zona onde se inseriam.

Através do estudo efetuado por Cimellaro et al [28] relacionado com o sismo de 2009 em Itália, na basílica de Santa Maria di Collemaggio, constatou-se que os danos consequentes do mesmo foram muito semelhantes aos danos ocorridos no património religioso dos Açores devido ao sismo de 9 de julho, pois o tipo de construção era também muito semelhante, sendo os mesmos em estruturas muito antigas, variando apenas a constituição dos materiais devido à localização onde se encontram inseridos.

Enquadramento Geral

3.1. Introdução

O presente capítulo pretende caracterizar, de uma forma geral, o Arquipélago dos Açores, desde a sua geração, a sua história, os seus recursos naturais e fundamentalmente as suas atividades sísmicas que são relevantes nesta Região.

Posteriormente passa-se a caracterizar em termos gerais a sociedade da Região, assim como a sua atividade sísmica, destacando-se os sismos mais recentes, em particular o de 9 de julho de 1998.

3.2. Caraterização Social

O arquipélago dos Açores foi descoberto em 1427, tendo sido só por volta de 1432 que os portugueses começaram a povoar as ilhas, não sendo os únicos, pois, chegaram também por esta altura Flamengos, Ingleses, Europeus e Norte-Africanos [8]. O arquipélago é constituído por 9 ilhas de natureza vulcânica, que estão divididas em três grupos: Ocidental, Central e Oriental. Sendo o Ocidental constituído pelo Corvo e Flores, o Central pelo Faial, Pico, São Jorge, Graciosa e Terceira, e o Grupo Oriental por São Miguel e Santa Maria, como se pode observar na Figura 2.



Figura 2 - Constituição do Arquipélago dos Açores [16].

O arquipélago desenvolveu-se ao longo de milhões de anos, em que apenas uma parte da sua história eruptiva encontra-se acessível através de afloramentos, localiza-se no Oceano Atlântico Norte, a cerca de 1600 km de Portugal Continental, cobre uma área de cerca de 600 Km de comprimento e 200 Km de largura, e situa-se na junção das três placas litosféricas, a Americana, Euroasiática e Africana [12].

De acordo com os últimos censos efetuados, disponíveis no Instituto Nacional de Estatística [22], o Arquipélago dos Açores tem uma população de 676,342. Na Tabela 1 podem ser verificadas as características do arquipélago e perceber a sua dimensão quer a nível de população quer de área, altitude máxima e perímetro por ilha. Constata-se também a dificuldade de implementação de mesmas infraestruturas públicas de primeira necessidade por todas as ilhas, devido ao seu número de habitantes assim como à distância que as separa. Para tal tenta-se equilibrar as mesmas de forma a conseguir atender a toda população, de modo que as pessoas residentes em ilhas mais pequenas têm a necessidade de se deslocar às ilhas mais desenvolvidas para usufruir dessas infraestruturas.

Tabela 1 - Características das Ilhas dos Açores [3,22].

	Superfície Total (Km²)	Altitude Máxima (m)	Perímetro (Km)	População (2011)
Santa Maria	97,4	590	63,4	5,552
São Miguel	746,8	1103	213,3	137,856
Terceira	402,2	1022	90,0	56,437
Graciosa	62,0	402	38,9	4,391
São Jorge	237,6	1053	128,0	9,171
Pico	447,0	2351	125,9	14,148
Faial	172,4	1042	72,7	14,994
Flores	141,7	915	71,6	3,793
Corvo	17,1	718	19,0	430
			Total	676,342

Em relação à população, é de notar que a ocorrência de catástrofes naturais levou a que muitos habitantes das ilhas emigrassem para outros países, nomeadamente para os Estados Unidos, fazendo com que fossem ficando cada vez menos pessoas a residir nas ilhas açorianas.

3.3. Caraterização Sismológica

A Região dos Açores é também reconhecida pela sua sismicidade, que decorre da atividade vulcânica e tectónica da crista Atlântica, com um número de sismos muito elevado [7]. Um fator de grande importância que também tem uma notória influência na sua sismicidade é a sua localização geotécnica na junção das três placas litosféricas. A sismicidade retrata também a atividade vulcânica com alguma intensidade ocorrida nos Açores, visto que esta é em grande parte dos casos acompanhada ou antecedida por sismos [13]. Posteriormente, no Capítulo 4 é feita uma descrição dos respetivos fenómenos.

As catástrofes naturais como os eventos sísmicos são algo impossível de evitar, no entanto podem ser tomadas muitas medidas para mitigar os seus efeitos. As catástrofes sísmicas são compostas por duas componentes: a ocorrência dos sismos em determinados locais, onde o Homem pouco pode fazer e o efeito dos sismos nas construções, onde o Homem tem muitas responsabilidades, visto que é possível intervir no sentido de proporcionar às construções uma resistência adequada [8].

A falta de resistência das construções face à ação sísmica é a principal responsável pelas consequências ocorridas. Com a evolução das técnicas de construção, reabilitação e reforço observa-se uma diminuição dos danos causados pelos sismos.

3.4. Sismos recentes, em particular o sismo de 1998

O sismo de 9 de julho de 1998 no Grupo Central dos Açores, objeto de estudo na presente dissertação, foi considerado um dos mais catastróficos na história recente desta Região, danificando um grande número de edifícios nas ilhas do Faial e Pico [8]. Antes da ocorrência desse sismo a maioria das construções tinham uma tipologia tradicional, com base em paredes estruturais de alvenaria de pedra, pavimentos e as treliças do telhado em madeira.

Todos os materiais utilizados nas construções tradicionais eram unicamente recursos naturais existentes na região, principalmente devido à dispersão e isolamento das Ilhas e quantidade de pessoas que nelas habitavam. Refira-se que devido às crises sísmicas permanentes tornavam-se um pouco isoladas. Os principais recursos disponíveis eram a madeira e a pedra, que existiam em abundância em todo o arquipélago e não havia qualquer preocupação com o comportamento sísmico.

Ao longo dos anos, com a evolução dos meios de transporte e comunicação conseguiu-se fazer com que a Região dos Açores se tornasse mais próxima de Portugal Continental, permitindo a importação de materiais com uma maior facilidade e rapidez, possibilitando construções mais resistentes. O avanço da tecnologia nesta área constitui-se numa ajuda imprescindível para o melhor desempenho das construções face ao sismo.

Devido à sua construção de fraca qualidade, pois os recursos existentes não permitiam uma construção melhor, as consequências ao nível estrutural provocadas pelo sismo 1998 foram em muitos dos casos desastrosas. Sendo em alguns casos o nível de destruição tão elevado que não foi possível a sua recuperação, como se pode observar na Figura 3.



Figura 3 - Imagens de destruição total do sismo de 1998 [3,24].

No entanto, em relação ao património religioso, na sua maioria foi possível executar intervenções de reabilitação e reforço para melhorar o seu comportamento face ao sismo. Tendo sido essas alterações baseadas na construção atual, tradicional ou mista na Figura 4 podem se observar alguns dos danos ocorridos no património religioso.



Figura 4 - Imagens de alguns danos ocorridos pelo sismo [24].

3.5. Conclusão

O Arquipélago dos Açores é muito antigo, de uma beleza inigualável, no entanto possui características únicas que o distinguem pelos seus riscos naturais transmitindo à sua população todo o respeito e preocupação que merece, devido às consequências que podem surgir. É de sublinhar também a população que abandonou os Açores devido às catástrofes naturais que assolaram este arquipélago, fazendo com que as pessoas procurassem noutros países outro conforto, de forma a ultrapassar as dificuldades.

Em relação ao sismo de 9 de julho de 1998, pode ser considerado como um dos mais catastróficos da história recente do Arquipélago dos Açores, principalmente devido ao nível de destruição observado.

De uma forma geral pode-se concluir que com o passar dos anos, e conseqüentemente com a evolução dos meios de comunicação, materiais e técnicas de construção, as estruturas passaram a comportar-se consideravelmente de uma forma muito melhor, o que faz com que o tempo de vida útil das estruturas aumente consideravelmente. Como consequência nota-se assim um nível de destruição provocado pelos sismos mais recentes inferior em relação aos sismos anteriores. No entanto, em relação ao sismo de 1998 observou-se ainda um nível de destruição considerável, pois grande parte das estruturas eram muito antigas.

Caracterização da Sismologia no Arquipélago dos Açores

4.1. Considerações Gerais

O arquipélago dos Açores é uma região com risco sísmico reconhecido. O sismo é um fenómeno natural e incontrolável desta Região que não se consegue evitar, no entanto podem ser tomadas medidas preventivas para que os seus efeitos sejam os mínimos possíveis, nomeadamente nas estruturas mais antigas, tais como o património religioso.

Até ao século XVIII acreditava-se que os sismos eram castigos sobre a humanidade, sendo as descrições destes dominadas pelo pânico, tornando-se difícil apurar a veracidade dos factos. Atualmente, já se compreende que sismos surgem como resultado natural da adaptação das forças no interior da terra à evolução das camadas superficiais da mesma, e já se consegue prever os locais prováveis da sua ocorrência, assim como a avaliação das intensidades máximas prováveis num determinado período de tempo [8].

Devido à importante sismicidade, no contexto nacional que se faz sentir no Arquipélago dos Açores, associada à tectónica e à sua atividade vulcânica, no presente capítulo pretende-se apresentar a forma como estes se processam, como são analisados e tudo aquilo que está na sua origem.

4.2. Origem de um Sismo

Os sismos são movimentos vibratórios, apresentando em alguns dos casos uma grande intensidade. Surgem como consequência de dissipação de energia que existe no interior da terra. A energia libertada provoca movimentos de segmentos da crosta terrestre, levando assim à ocorrência do sismo [3], como ilustra o esquema da Figura 5.

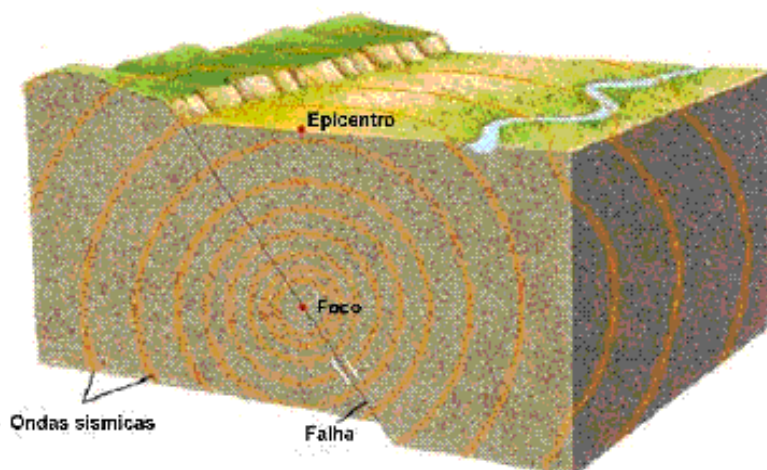


Figura 5 - Propagação das ondas sísmicas [17].

Deste modo, a sua ocorrência está associada à súbita libertação de grandes quantidades de energia, sendo antecedida de uma fase de acumulação da mesma na crosta terrestre. Esta acumulação deve-se à restrição que é imposta à movimentação dos vários segmentos da crosta. Quando esta energia acumulada excede a capacidade resistente do segmento da crosta, ocorre a rotura material, provocando a libertação de tensões acumuladas durante décadas, séculos ou milénios, a partir de lentos processos de deformação da camada exterior em apenas alguns segundos ou minutos [8].

A ocorrência dos sismos pode surgir devido a vários fatores, que se distinguem consoante o fator que os origina. Podem ser de origem tectónica, vulcânica ou artificial. Os sismos de origem vulcânica resultam da intrusão de magma em fissuras da crosta, os de origem tectónica estão relacionados com a consequência do fator, resultando assim da rotura das falhas geológicas, e por fim os artificiais que surgem por explosões subterrâneas [3].

Desde a descoberta e povoamento das ilhas, em meados do século XV, que existem bem documentadas na informação histórica disponível a atividade vulcânica e sísmica. Um total de 26 erupções vulcânicas nas ilhas de São Miguel, Terceira, São Jorge, Pico e Faial, sendo elas na sua grande maioria de natureza básica e predominantemente efusivas [21 – p.59].

O arquipélago é constituído por ilhas de natureza vulcânica que apresentam uma grande variedade de formas e características próprias devido a essa atividade, sendo também uma das responsáveis pela sua origem, que ainda hoje se mantém ativa, de uma forma moderada, através da ocorrência de pequenos sismos. Na Figura 6 podem-se observar algumas destas

características.



Figura 6 - Características próprias da atividade vulcânica [18].

A atividade sísmica de origem vulcânica é caracterizada por iniciar-se por pequenos sismos que vão aumentando a sua intensidade até atingirem um pico a partir do qual começam a diminuir. Esta atividade ainda hoje se mantém, de uma forma moderada através de fumarolas e pequenos sismos. Já a atividade sísmica de origem tectónica, resulta de movimentos provocados pelas placas litosféricas nas zonas de encosto, designadas por falhas, provocando assim abalos com uma maior perigosidade, pelo fato de se iniciar por um abalo de maior intensidade e inesperado, seguindo-se de réplicas que vão diminuindo de intensidade [3].

Em relação à sismicidade de origem tectónica, esta está relacionada com a sua localização no Atlântico Norte, devido ao limite das placas litosféricas entre a Eurásia, África e América do Norte, como já foi referido anteriormente (ver Figura 7). A região já presenciou vários abalos, tendo sido alguns deles com alguma intensidade, como o sismo de 1980 que se localizou entre as Ilhas Terceira e São Jorge, o de 1997 na zona Oriental do arquipélago, entre as Ilhas Terceira e São Miguel, zona que possui um elevado nível de sismicidade, e por fim o de 1998, cujo seu epicentro localizou-se a 8km NE da Ilha do Faial [6].

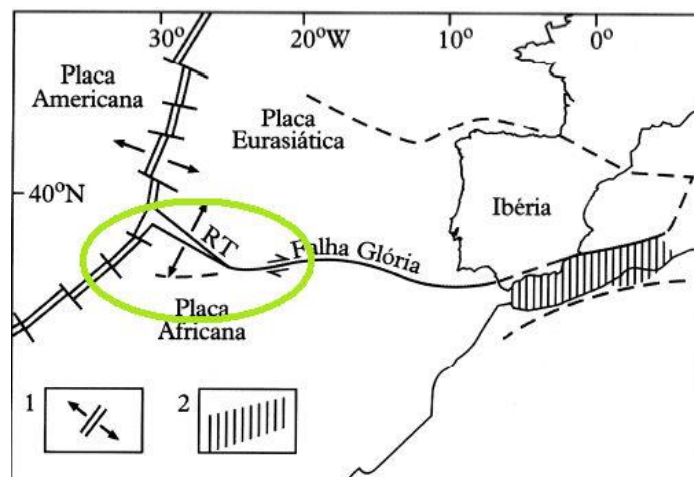


Figura 7 - Localização das Placas Litosféricas [3].

As nove ilhas que constituem o arquipélago foram originadas pelo contacto entre as diversas placas que se intersectam. Este mecanismo acaba por ser o principal dos fenómenos de natureza vulcânica e sísmica que se verificam na região.

É fundamental perceber um pouco a tectónica das placas de forma a compreender melhor a ocorrência dos sismos desta origem. O interior da terra pode ser dividido em duas camadas, sendo elas a litosfera e a astenosfera. A litosfera é uma camada rígida e fria, sendo mais espessa nas regiões continentais e mais delgada nos oceanos, a astenosfera situa-se numa região mais interior, mais quente e de menor rigidez. Assim, a litosfera é constituída por várias placas aproximadamente indeformáveis, que se deslocam sobre a astenosfera, provocando a formação de uma nova litosfera nas cristas centrais oceânicas. Nas fronteiras que separam as placas tectónicas, o atrito opõe-se ao movimento relativo dos bordos, provocando assim que o deslizamento ocorra por impulsos, quando as tensões ultrapassam a resistência. Este é o fenómeno principal responsável pela atividade sísmica no planeta [8].

4.3. Sismos nos Açores

A sismicidade dos Açores caracteriza-se por ser elevada em termos de frequência. Contudo a generalidade dos sismos apresenta baixos valores de magnitude. Os sismos que dão origem a intensidades superiores a VIII, na escala de Mercalli, são pouco frequentes, destacando-se desde o povoamento das Ilhas até à atualidade cerca de 31 sismos com estas características. Para além destes, existem ainda cerca de duas dezenas de ocorrências vulcânicas, as quais gerando sismos com efeitos destrutivos [21].

A partir de dados recolhidos ao longo dos últimos anos é possível reconhecer uma variação dentro das crises sísmicas ocorridas. Por vezes a crise sísmica aparece de forma irregular, com sismos mais energéticos distribuídos ao longo da série. Um bom exemplo deste tipo de crise pode ser o sismo ocorrido no Oeste da Ilha do Faial em 1992/1993. Outras vezes a crise é o sismo de maior intensidade. A este tipo de crise pode-se associar o sismo do Faial de 1998, [21]

Na Figura 8 pode-se verificar a distribuição geográfica dos centros eruptivos no arquipélago destacando-se, de grosso modo, uma tendência de crescimento das ilhas para ocidente, designadamente pela localização dos centros eruptivos submarinos que definem os principais

alinhamentos estruturais que afetam a região dos Açores. De igual forma a distribuição das idades máximas das ilhas parece mostrar que, em termos gerais, as ilhas mais afastadas da Crista Médio Atlântica são as mais antigas [21].

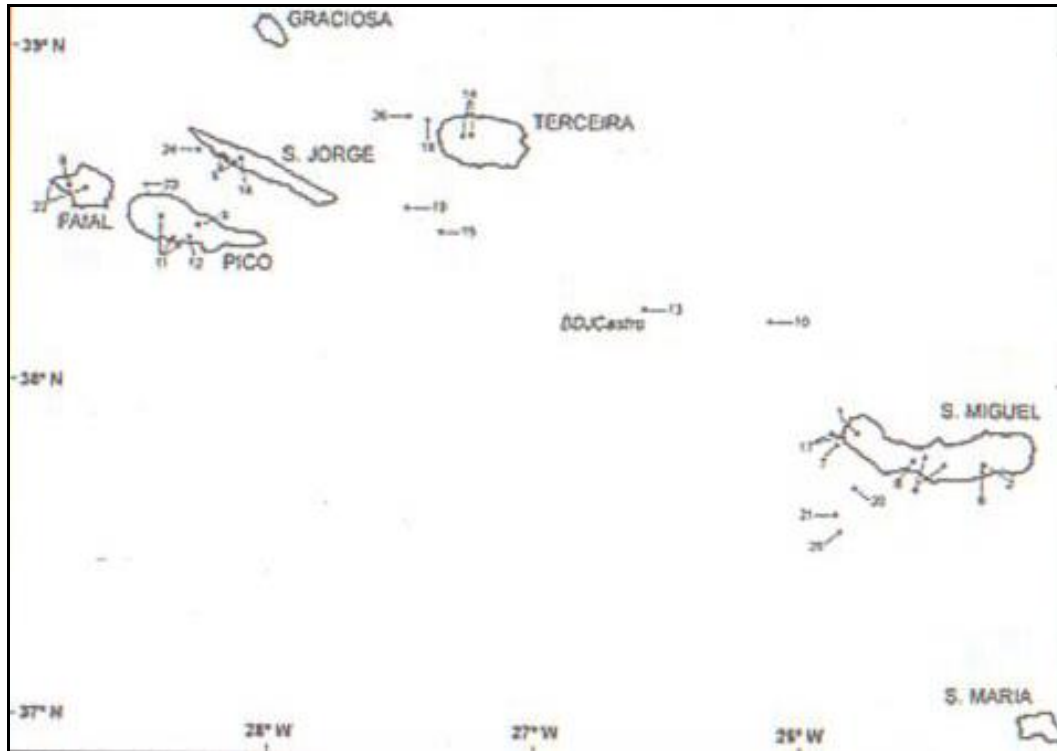


Figura 8 - Distribuição geográfica dos centros eruptivos no arquipélago [21].

Ao longo dos anos os eventos sísmicos ocorridos e registados foram aumentando, não devido a um aumento de atividade sísmica, mas sim devido à evolução tecnológica. Pois atualmente conseguem-se registar todos os abalos que ocorrem, ou pelo menos a sua maioria, o que não se conseguia antigamente.

Um aspeto fundamental para uma região como a dos Açores com elevada sismicidade, é a existência de redes sísmicas regionais para que haja uma boa monitorização da atividade sísmica, assim como o reforço da rede com várias estações sísmicas digitais portáteis. Pois se a instrumentação existente for insuficiente para registar de forma completa a totalidade dos eventos anormais que possam ocorrer torna o acontecimento ainda mais gravoso devido às consequências que poderão ocorrer.

4.3.1. Principais Sismos Ocorridos

Devido à localização e origem do arquipélago a sismicidade ocorre pela sua atividade vulcânica, visto que esta é acompanhada e antecedida por crises sísmicas de maior ou menor intensidade. De acordo com os variados registos efetuados ao longo dos anos contabilizam-se 32 sismos (ver na Tabela 2), com intensidade igual ou superior a VII sentidos no arquipélago, desde a sua descoberta e povoamento das ilhas, onde causaram estragos, algumas vezes generalizados em diversas ilhas, e provocaram entre 5345 a 6350 vítimas, no entanto a atividade sísmica desta Região é bem mais frequente [13].

Tabela 2 - Sismos de intensidade superior a VII, ocorridos no Arquipélago dos Açores [13].

Data	Localidade/Ilha mais afetada	Epicentro Prof.	Máx. Int. Obs.	Vítimas Mortais	Observações
1522/10/22	V.Franca/S.Miguel	37.7°N/25.5°W 12Km	X	4000 a 5000	02h T.L 20000 hab.
1547/05/17	Zona N/Terceira		VII/VIII	>3	11-12h T.L
1571/08/??	?/Terceira		VII ?		
1591/07/26	V.Franca/S.Miguel		VIII/IX	"muitas"	
1614/05/24	P.Vitória/Terceira	a E de P. Vitória	IX	>200	15:15h T.L
1713/12/08	Ginetes/S.Miguel		VIII/IX		
1730/06/13	Luz/Graciosa	Caldeira	VIII/IX?		
1757/07/09	Calheta/S.Jorge	38.6°N/28.0°W 10.7Km	XI	1046	23:45H t.l.; tsunami; M=7.4; E~5x10 ²⁴ ergs
1800/06/24	P.Vitória Terceira	a E da Terceira	VII/VIII	0	13:45h T.L
1801/01/26	S.Sebastião/Terceira	a E da Terceira	VIII	2	15:30h T.L
1837/01/21	Guadalupe e S.Cruz Graciosa		IX?	3	
1841/06/15	P.Vitória/Terceira	a E da P.Vitória	IX	0	
1852/04/16	Rib.Grande/S.Miguel		VIII	9 a 12	22:05h T.L
1881/02/09	Povoação/Miguel		VII?	1	
1912/01/26	A.Heroísmo/Terceira				
1912/11/06	P.Vitória/Terceira		VII/VIII		21:00h
1926/08/31	Horta/Faial	38.5°N/28.6°W 1.6-4.8 Km	X	9	10:42h TMG Mb=5.3-5.9
1932/08/05	Povoação/S.Miguel	37.8°N/25.1°W	VII		21:24h TMG I ₀ =IX
1935/04/27	Povoação/S.Miguel	37.7°N/25.4°W	VII	1	
1937/11/21	S.Espírito/S.Maria	36.8°N/26.1°W	VII		
1939/05/08	S.Espírito/S.Maria Rib.Quente/S.Miguel	37.0°N/24.5°W	VII		I ₀ =X, M _b =7.0-7.1
1945/06/15	Capelo/Faial		VII		01:40h
1946/12/27	Serreta/Terceira		VII/VIII		18:30h
1950/12/29	Agualva/Terceira	38.7°N/27.2°W	VII		16:03h TMG
1952/06/26	Povoação e R.Quente S.Miguel	37.7°N/25.3°W	VII		13:06h TMG
1952/06/26	Rib.Quente/S.Miguel	37.7°N/25.3°W	VIII		15:32h TMG
1958/05/13	Praia Norte e R.Funda Faial	38.6°N/28.3°W 9Km	VIII/IX		
1964/02/21	Rosais/S.Jorge	38.7°N/28.2°W 9Km	VIII		17:14h TMG; M _b =5.5 I ₀ =VIII/IX
1967/08/10	M.Escuro/S.Miguel	37.8°N/25.4°W	VII		05:26h TMG; M=4.6
1968/06/17	Várzea/S.Miguel	37.7°N/25.9°W	VII		17:22h TMG; M _b =5.0
1973/11/23	Bandeiras/Pico	37.8°N/25.4°W	VII/VIII		13:36h TMG; M _b =5.0
1980/01/01	Doze Rib./Terceira	38.8°N/27.8°W 10 Km	VIII/IX	61	16:42h TMG; I ₀ =XI; M=7.2
1998/07/09	Ribeirinha/Faial	38.7°N/28.5°W 1.2 Km	VIII/IX	8	05:19h TMG M _b =5.8

Analisando a tabela constata-se que nos últimos 50/60 anos houve um maior número de abalos sísmicos. Como já foi referido anteriormente esta situação deve-se ao fato de nestes últimos anos haver registos mais eficazes destes eventos, pois nos anos anteriores sempre houve atividade sísmica.

A magnitude máxima atingida pelos abalos foi de 7.4 na escala de Richter [13]. Verifica-se também que com o passar dos anos o número de vítimas por cada século vai diminuindo, pois as construções vão sofrendo intervenções de reabilitação e reforço sísmico de forma a prevenir as mesmas para eventos futuros. Importa referir que a quantidade de microssismos registados nas ilhas, embora não provoquem danos destrutivos nas construções provocam sempre alguns danos relevantes como as fissurações e microfissurações.

Em relação ao período de retorno dos sismos constata-se que este é muito irregular, pois antes do sismo de 1998, o último sismo de intensidade semelhante tinha ocorrido em 1980, tendo sido sete anos antes o penúltimo sismo com uma intensidade idêntica, assim como para os restantes anos em que o período de retorno dos sismos varia entre dois, seis, quatro, entre outros anos, tal como se pode observar na Tabela 3. Assim, perante tal situação verifica-se que não existe um período de retorno minimamente regular, de forma a que a população possa estar preparada para tal. É de notar também que após o sismo de 9 de julho de 1998 não houve a ocorrência de mais nenhum sismo de intensidade semelhante, tendo este ocorrido há 17 anos atrás.

4.4. Conclusão

Os sismos são fenómenos naturais e incontrolláveis do Arquipélago dos Açores que não se conseguem evitar, daí ao longo dos anos a aposta nas medidas preventivas, especialmente nas estruturas mais antigas, ser tão importante, para que as consequências dos mesmos sejam as mínimas possíveis.

Esta atividade sísmica encontra-se associada à tectónica e à sua atividade vulcânica, em que a tectónica está relacionada com a sua localização, resultando de movimentos provocados pelas placas litosféricas nas zonas de encosto, provocando abalos com uma maior perigosidade, já a vulcânica é caracterizada por iniciar-se em pequenos sismos que vão aumentando até ser atingido um pico a partir do qual os mesmos começam a diminuir

Com o passar dos anos os registos dos sismos foram aumentando, não devido a um aumento de atividade sísmica, mas sim devido à evolução tecnológica e científica, pela facilidade em que se consegue registar todos os abalos que ocorrem, pois antigamente não existiam meios que permitissem um registo detalhado dos mesmos. Assim como o número de vítimas e o nível de destruição provocado por um sismo de maior intensidade, pois devido à evolução tecnológica existem muitas medidas preventivas que podem ser aplicadas, conseguindo assim uma maior resistência nas estruturas evitando grandes danos e conseqüentemente vítimas mortais.

Sismo de 9 de julho de 1998

5.1. Considerações Gerais

Na madrugada do dia 9 de julho de 1998, no arquipélago dos Açores, fez-se sentir um sismo de magnitude 6.2 na escala de Richter, particularmente no grupo Central, com especial incidência nas ilhas do Pico e Faial, onde causou grande destruição. O epicentro localizou-se no mar, entre as duas ilhas mais afetadas e a cerca de 5 km da costa do Faial [5], como se pode observar na Figura 9.



Figura 9 - Grupo Central e localização do epicentro do Sismo de 1998 [19]

Na Figura 10 pode-se ainda observar, de uma forma mais pormenorizada, as freguesias constituintes das Ilhas do Pico e Faial, mais afetadas pelo sismo de 1998.

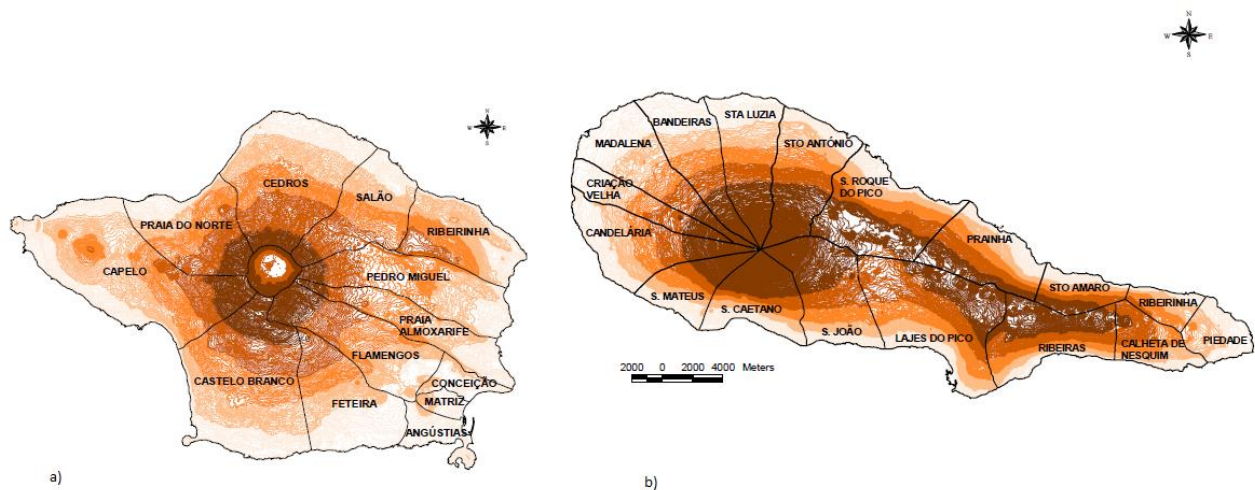


Figura 10 - a) Freguesias da Ilha do Faial; b) Freguesias da Ilha do Pico.

O sismo de 9 de julho de 1998 no Grupo Central dos Açores foi considerado um dos mais catastróficos na história recente dos Açores, dando origem a um grande número de edifícios danificados nas ilhas do Faial e Pico, provocando a morte de 8 pessoas, cerca de 150 feridos e 2900 sinistrados. A ilha do Faial foi a mais afetada, com uma intensidade máxima de VIII na zona da Ribeirinha, tendo como direção predominante do movimento do abalo Norte-Sul, como indica a Figura 11, com uma duração de vinte e quatro segundos aproximadamente [3]. A respetiva zona da Ribeirinha sofreu uma destruição de 78% do parque habitacional, para além do património construído e infraestruturas básicas. Os efeitos deste sismo também se fizeram sentir ao nível de movimentos de massa e recuos de arribas [21].

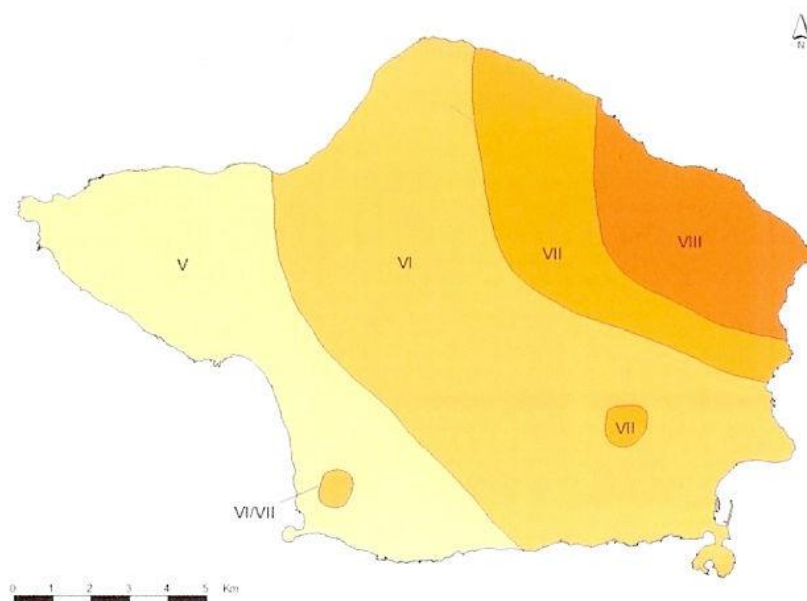


Figura 11 - Carta de isossistas do sismo de 1998 na Ilha do Faial [3].

Causou mais danos no Arquipélago desde o sismo de 1 de janeiro de 1980. Este não foi

precedido de qualquer sismicidade irregular, tendo sido a sismicidade observada durante o mês anterior ao evento estado dentro dos padrões normais. No entanto após o sismo principal verificou-se uma crise sísmica que durou cerca de quatro anos, a qual originou no primeiro mês cerca de 7000 eventos, dos quais aproximadamente 325 foram sentidos pela população [21]

Perante tal acontecimento foi necessário proceder-se a um estudo das causas, o seu efeito nas construções e as técnicas de reforço mais apropriadas para dar suporte técnico e científico à reabilitação das estruturas danificadas. Tornou-se então necessário conhecer o tipo de construção mais comum no arquipélago, as técnicas e materiais usados na sua realização, e por fim o tipo de comportamento que as respetivas estruturas apresentam face ao sismo [8]. Antes da ocorrência do sismo de 1998 a maioria das construções eram de uma tipologia tradicional, com base em paredes estruturais de alvenaria de pedra, pavimentos e as treliças do telhado em madeira [10].

As Igrejas foram das estruturas de maiores dimensões atingidas pelo sismo, muitas delas antigas e em alvenaria [5]. Após a ocorrência do sismo foi realizada uma análise relacionada com as patologias mais frequentes verificadas ao nível dos edifícios do património religioso [3]. Assim como um levantamento e análise de todos os danos ocorridos de forma a auxiliar nas intervenções de reabilitação aplicadas posteriormente.

5.2. Danos provocados pelo Sismo

Os danos provocados por um sismo nas construções dependem da intensidade do mesmo, mas também da resistência e qualidade da construção, daí tornar-se importante a compreensão do comportamento dos vários elementos estruturais dos edifícios antigos face ao sismo.

O nível de destruição verificado pelo sismo de 1998 foi muito elevado, provocando danos severos em edifícios, infra-estruturas e também em redes de abastecimento. Os edifícios de construção tradicional foram os mais afetados, principalmente nas paredes de alvenaria, fundações, coberturas e pavimentos [8]. Na Figura 12 pode-se observar, de uma forma geral, o nível de destruição presente na Ilha do Faial devido ao sismo.



Figura 12 - Destruição presente na Ilha do Faial [3].

Um outro aspeto relevante neste tipo de construções passa pela falta de projeto, devido à carência de regulamentos e normas tendo em conta a atividade sísmica a que estão sujeitas, pois apenas há algumas décadas é que se começou a por em prática a sua utilização. No entanto existiam as suas próprias regras que eram seguidas por todos, ou seja, uma cultura sísmica em que todos utilizavam nas construções, alterando-se de zona para zona consoante os recursos disponíveis.

Antes do sismo de 9 de julho de 1998 ocorreram outros sismos com intensidades consideráveis, no entanto não existiram grandes alterações nos processos construtivos, pois ainda não havia evolução tecnológica suficiente para tal, tendo sido a partir do sismo de 1998 que se começaram a por em prática técnicas de reabilitação e reforço mais resistentes e adequadas às exigências de hoje.

De uma forma geral constatou-se que os danos mais significativos ocorreram nas habitações mais vulneráveis, de construção tradicional, enquanto as casas construídas com betão, na generalidade, não apresentaram grandes estragos excetuando algumas com fundações deficientes.

Em relação ao património religioso das ilhas do Faial e Pico, elaboraram-se estudos da vulnerabilidade sísmica com base na metodologia apresentada pelo Grupo Nazional per la Difesa dai Terramoti (GNDT) da Itália [7]. Esta metodologia foi realizada com o auxílio de uma ficha de levantamento de danos e avaliação da vulnerabilidade sísmica, com recurso à abordagem apresentada pelo Ministério italiano de *Beni Culturali* e de *Lavori Pubblici*. A respetiva ficha está dividida em três partes, em que (i) na primeira é feito um conhecimento geral da estrutura com toda a informação da mesma, (ii) na segunda é feita uma classificação

dos diferentes mecanismos de dano observados e a avaliação da vulnerabilidade da igreja correspondente a cada mecanismo, e (iii) na terceira parte é feito um cálculo dos vários índices relacionados com o comportamento sísmico da estrutura.

Fez-se também o levantamento dos danos ocorridos nas diversas construções afetadas com base numa ficha executada pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), que permitiu a realização do levantamento das dimensões gerais das construções e a quantificação em termos percentuais das áreas consideradas recuperáveis e irre recuperáveis por cada grupo de componentes estruturais, como: paredes interiores, cobertura e pavimentos [3]. Após a recolha de toda a informação procedeu-se à sua análise de forma a perceber os danos ocorridos assim como a execução de uma estimativa de custos e reabilitação das construções em causa.

Posteriormente no Capítulo 7 será descrito todo o procedimento efetuado na análise dos danos ocorridos, com recurso aos métodos referidos.

Nos vários estudos executados [4,5,7,8,9,10,11,23,27,29], relacionados com as igrejas do Faial e do Pico, danificadas pelo sismo de 1998, constatou-se que todas possuíam coro alto e que no geral estas apresentavam danos relacionados com o comportamento sísmico do mesmo. Na Figura 13 pode-se observar a localização do respetivo coro alto, sendo a igreja uma das atingidas. Os referidos danos surgem da sua interação com a restante estrutura [7]. Tornou-se também evidente que grande parte dos edifícios apresentavam deficiências logo na sua construção, refletindo-se no seu comportamento quando solicitados por um sismo [8].



Figura 13 - Igreja de Nossa Senhora da Boa Nova, freguesia das Bandeiras, atingida pelo sismo de 1998 [7].

O património religioso sofreu danos praticamente comuns deste tipo de estruturas, tais como [3]:

- Movimento longitudinal ou transversal dos arcos nas igrejas que possuíam mais que uma nave;
- Rotura das cúpulas na zona do altar;
- Rotura dos frontões da fachada;
- Abertura de fendas;
- Deslocamentos consideráveis nas torres sineiras;
- Queda de elementos decorativos da fachada, que embora não sejam de carácter estrutural conduziram ao colapso de algumas estruturas de cobertura.

Na Figura 14 podem-se observar algumas imagens dos danos mencionados anteriormente.



Figura 14 - Alguns danos provocados pelo sismo de 1998 [3].

Existem ainda danos não estruturais que o sismo 1998 provocou, conduzindo assim a algumas patologias, consideradas danos diretos do abalo, o deslizamento de telhas de canudo, sem qualquer tipo de fixação da telha à estrutura, resultando no perigo de queda da telha para a via pública e também a necessidade de reparar os mesmos [3].

De uma forma geral estas estruturas foram muito afetadas pelo sismo devido à sua idade avançada, com materiais degradados pelo tempo e também devido ao tipo de construção utilizada na sua época, tendo como principal consequência a perda da sua resistência sísmica. Alguns destes problemas estão relacionados nomeadamente com [3]:

- A falta de rigidez, resistência e homogeneidade das paredes de alvenaria resistentes;
- Falta de apoios ao longo da altura dos edifícios;
- Pouca rigidez das estruturas de madeira, utilizadas nos pavimentos e coberturas;
- Descontinuidades horizontais e verticais, originando forças sísmicas maiores nas zonas de ligação.

5.3. Conclusão

O sismo de 9 de julho de 1998, com uma magnitude de 6.2. na escala de Richter, fez-se sentir no arquipélago dos Açores, nomeadamente no grupo Central, nas ilhas do Pico e Faial, tendo sido a ilha do Faial a mais afetada. Foi o que causou mais danos desde o sismo de 1 de janeiro de 1980, tendo sido considerado um dos mais catastróficos da história recente dos Açores.

Em relação ao património religioso, este foi um tipo de estrutura muito atingida pelo sismo, pois muitas das igrejas eram antigas e em alvenaria, com processos construtivos e materiais já muito degradados.

Após o sismo foram efetuados vários estudos e levantamentos de toda a informação necessária para apoio ao processo seguinte, que foi a reabilitação das igrejas. Para tal a análise da informação recolhida foi essencial para que as igrejas fossem intervencionadas adequadamente, tendo em conta que na altura da sua construção não haviam meios nem recursos suficientes para que as construções fossem executadas com segurança.

Caracterização Construtiva do Património Religioso

6.1. Considerações Gerais

No presente capítulo pretende-se descrever e caracterizar o património religioso dos Açores, em particular das Ilhas do Pico e Faial, do ponto de vista construtivo, realçando as alterações introduzidas ao nível do sistema construtivo e dos materiais ao longo das últimas décadas.

O património religioso é composto por catorze igrejas na Ilha do Faial e treze na Ilha do Pico, em que na sua generalidade duas das igrejas da Ilha do Faial e seis da Ilha do Pico não tiveram danos permitindo uma utilização imediata e apenas três delas na Ilha do Faial sofreram colapso eminente levando a uma impossível utilização, tal como se pode observar na Figura 15.



Figura 15 - Igreja de Pedro Miguel e de Ribeirinha, respetivamente [21].

Observando a Tabela 3, pode-se verificar a classificação dos danos para cada igreja, efetuada por uma equipa do ICIST – Instituto Superior Técnico, tendo sido 30% das igrejas com utilização imediata após o sismo por não terem sofrido danos, 37% tiveram apenas danos ligeiros podendo ter igualmente utilização imediata e 37% só após reparação dos danos, pois

neste caso eram danos significativos.

Tabela 3 - Classificação dos danos ocorridos no Património religioso das Ilhas do Faial e Pico [21].

Igreja		Classificação dos danos
Flamengos	FAIAL	
Pedro Miguel		
Praia de Almoxarife		
Ribeirinha		
Salão		
Cedros		
Ribeira Funda		
Capelo		
Castelo Branco		
Feteira		
Ermida do Pilar		
Angústias		
Conceição (Horta)		
Matriz (Horta)		
São Roque	PICO	
Santa Lúzia		
Bandeiras		
Santa Maria Madalena		
Santo António Monte		
Candelária		
São Mateus		
São Caetano		
S. Margarida		
São Bartolomeu		
São João		
Lajes		
Criação Velha		

Legenda	
	Sem Danos
	Utilização imediata
	Danos Ligeiros
	Utilização imediata
	Danos importantes
	Utilização após reparação
	Colapso eminente
	Utilização impossível

Em relação ao tipo de construção dos edifícios importantes para a população que caracteriza estas Ilhas dos Açores, existe uma escassez de informação e conhecimento, devido às sucessivas alterações a que estas estiveram sujeitas ao longo dos anos, em sequência das diversas catástrofes naturais que têm assolado as mesmas, assim como devido à procura da melhoria da sua construção e adaptação à sua utilização com o passar dos anos.

Nestas Ilhas a principal causa da perda do património histórico e arquitetónico deve-se aos

eventos sísmicos, pois na grande maioria dos casos os danos ocorridos são de um nível tão elevado, fazendo com que não se proceda à reabilitação das estruturas, principalmente pela falta de meios económicos para tal devido à sua complexidade.

Os monumentos históricos eram, em geral, construídos com materiais de melhor qualidade e recorrendo a técnicas construtivas especiais, permitindo assim vencer elevados vãos a grandes alturas interiores e elementos estruturais extremamente esbeltos. As características estruturais e particularidades construtivas destes edifícios, traduzem-se numa elevada vulnerabilidade, incomparável à dos edifícios correntes [6]. A necessidade de salvaguardar estas construções passa pela compreensão e análise da sua vulnerabilidade sísmica que consequentemente sustenta as estratégias de reforço.

Após toda a explicação mencionada nos capítulos anteriores, no contexto geodinâmico dos Açores, pode-se notar que o Arquipélago está sujeito a fenómenos sísmicos e vulcânicos de maior e menor importância, marcando de uma forma decisiva a vida desta População. O medo da destruição natural e incontrolável que afetou desde sempre os Açorianos está bem presente na sua construção típica, pois esta é o alvo predominante dos sismos. Apesar de não existirem regulamentos que permitissem com que toda a população seguisse as mesmas técnicas, havia uma cultura sísmica, em que toda a população seguia as mesmas regras anti-sísmicas, conseguindo assim este povo Açoriano, com o seu saber prático e dos materiais disponíveis na própria região, um tipo de construção particular e única do seu povo, pois só eles sabiam o poder de destruição a que poderiam estar sujeitos perante os sismos.

Nas secções seguintes será efetuada uma análise pormenorizada dos materiais utilizados nas suas construções, tais como a pedra, madeira, argamassas e telha, assim como dos processos construtivos mais comuns dos mesmos, relacionados com as fundações, paredes exteriores e interiores, pavimentos, coberturas, cunhais, vãos e arcos.

6.2 Materiais predominantes utilizados na sua construção

Tal como já foi referido anteriormente, a arquitetura tradicional das Ilhas apresenta uma simplicidade construtiva baseada na utilização de materiais presentes na própria Região, sendo eles a pedra basáltica, a argamassa nas paredes, a madeira nas coberturas e pavimentos e as telhas regionais nas coberturas [24], em que a sua preservação deverá ser uma obrigação

de todos os que intervêm no seu processo de construção e reconstrução.

Muitas das vezes estas estruturas sofrem alterações profundas nos seus sistemas construtivos tradicionais, técnicas e materiais, devido aos sismos que ocorrem, assim como a má resposta sísmica que as mesmas apresentam, geralmente associadas à falta de manutenção ou a danos sofridos em sismos anteriores, tendo como consequência o adulteramento das construções tradicionais.

Na sequência do sismo de 9 de julho de 1998, o conhecimento do tipo de construção e das técnicas de reforço que se manteve no património religioso e o tipo de alterações que foram introduzidas, é de extrema importância para o conhecimento futuro do comportamento dessas estruturas. Por outro lado, o comportamento estrutural do património religioso também irá permitir perceber quais foram os sistemas construtivos que melhor se comportaram e se possível avaliar os tipos de danos mais comuns em cada um desses sistemas construtivos. É neste contexto que se enquadra o presente trabalho, o qual será complementado, posteriormente, pela análise dos danos ocorridos no respetivo património religioso das ilhas do Faial e do Pico.

Para tal, torna-se imprescindível a descrição dos materiais de uso mais frequente neste tipo de estruturas para uma melhor compreensão e caracterização das mesmas.

6.2.1. Pedra

Todas as ilhas do arquipélago dos Açores são de origem vulcânica, no entanto existem determinadas variações geológicas, resultantes do tipo de erupção, da natureza do magma e da sua idade, sendo o basalto um denominador comum em todas as ilhas, atribuindo assim à sua paisagem os tons de cinzento-escuro, na Figura 16 pode-se observar algumas das suas aplicabilidades. Embora, na generalidade das ilhas, existam outras rochas, tais como: pedrapomes, andesitos, traquitos, tufos basálticos e traquíticos, bagacinas, pedra-queimada, areias e argilas [3].



Figura 16 - Imagens da aplicabilidade Basalto [3].

Ao longo da história das ilhas, os recursos geológicos disponíveis sempre foram essenciais nas suas construções, tendo as mais diversas aplicações, em que a necessidade da sua utilização contribuiu para uma otimização da sua aplicação. Posteriormente, na Tabela 4, pode-se verificar a importância destes materiais devido às suas diversas aplicabilidades nas construções com o uso dos diferentes recursos geológicos.

Tabela 4 - Recursos Geológicos e a sua aplicabilidade [3].

Recursos Geológicos	Características	Aplicação
Basalto	Cor acinzentada escura ou clara. Rocha vulgar, presente em todas as ilhas.	Alvenarias; Cantaria; Revestimento de vias; Guias e pedras de passeios; Agregado para betões; Lintéis; ombreira; pavimentos.
Traquitos (inexistente em Santa Maria, São Jorge e Pico)	Cor acinzentada clara. Grande alterabilidade.	Cantaria; Estatuária; Adornos de passeio.
Ignimbritos	Cor acastanhada, por vezes cinza escuro.	Cantaria; Estatuária; Adornos de passeio.
Pedra-Pomes (inexistente em Santa Maria, São Jorge e Pico)	Tom claro. Cor branca, amarela, cinza ou bege. Extremamente porosa e de baixa densidade.	Agregado para betões leves; Fabrico de blocos; Limpeza.
Tufos	Cor cinza clara a bege. Aspeto areoso. Material trabalhável, mas muito resistente.	Blocos; Argamassas.
Bagacina ou Cascalho	Cor negra ou avermelhada.	Blocos; Enchimento de alvenarias; Isolante; Pavimento de estradas.
Obsidiana	Cor negra e brilho vítreo.	Lã de vidro; Estatuária; Joalharia.
Argilas e Pozolonas (Santa Maria)	Resultam da alteração de basaltos, traquitos ou pedrapomes. Fraca plasticidade.	Telhas; Cimento; Tinta; Louça.
Calcários (Santa Maria)	Cor clara.	Cantaria; Passeios.

Pode-se verificar que a pedra basáltica é o material predominante, devido à sua abundância e às suas diversas aplicabilidades, podendo ainda ser utilizada em escadas, lajes de pequeno vão, varandas e arcos. É uma rocha de resistência variável, densa e resistente à meteorização. No entanto, recorre-se também aos restantes materiais que possuem uma melhor trabalhabilidade, sendo estes mais suscetíveis de se degradarem por meteorização [24].

Na construção de edifícios antigos a pedra é frequente especialmente em alvenaria, sendo

mais utilizada nomeadamente nas paredes. Existem diversos tipos de alvenarias, isto deve-se ao facto de cada região utilizar os materiais disponíveis na mesma. Sob o ponto de vista do comportamento sísmico das alvenarias com funções estruturais, é importante distinguir essencialmente dois tipos: (i) alvenaria de pedra regular, em que as pedras eram cortadas em paralelepípedos e colocadas nas construções de forma a apenas deixar juntas de espessura reduzida entre elas e (ii) alvenaria irregular, em que o material de enchimento não é trabalhado antes de ser colocado em obra, gerando muito maior espaço a ser preenchido pelo ligante [25].

Tecnicamente este material caracteriza-se por usufruir de uma grande diversidade de materiais e técnicas utilizadas na construção de paredes de alvenaria, resultando numa especificidade para cada caso, apesar dessa variedade, é possível estabelecer algumas propriedades mecânicas comuns a grande parte das alvenarias, pois possuem uma fraca resistência às tensões de tração, uma razoável resistência às tensões de corte e uma melhor resistência a tensões de compressão. Sendo a coesão, a adesão e o atrito fatores fundamentais na caracterização do comportamento da alvenaria ao corte, sob a tensão tangencial máxima admissível da alvenaria traduzida pela *Lei de Coulomb* [26], representada na Equação 1.

$$\tau = c_u + \sigma \tan \phi$$

Equação 1 - Tensão tangencial máxima admissível da alvenaria [26].

Em que, c_u é a coesão;
 ϕ é o ângulo de atrito interno;
 σ é a tensão normal de compressão;
 τ é a tensão tangencial máxima admissível da alvenaria.

Na tabela seguinte apresentam-se ainda outras características mecânicas fundamentais da pedra basáltica.

Tabela 5 - Características mecânicas da pedra basáltica [30].

Designação	Porosidade Máxima (%)	Peso Volúmico - γ_d (KN/m ³)	Coefficiente de permeabilidade - k (m/seg.)
Basalto	< 1,5	27,1	2,94 x 10 ⁻¹⁰

Em relação às tensões, nas Figuras 17, 18, e19 representam-se diagramas típicos de tensão-deslocamento referentes a ensaios de tração, compressão e de corte, de modo a observar-se o

comportamento deste tipo de material face a um determinado carregamento.

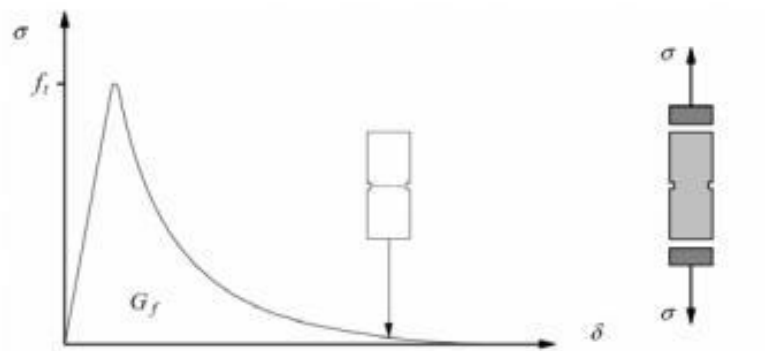


Figura 17 - Comportamento de espécimes de pedra submetidos a ensaio de tração [26].

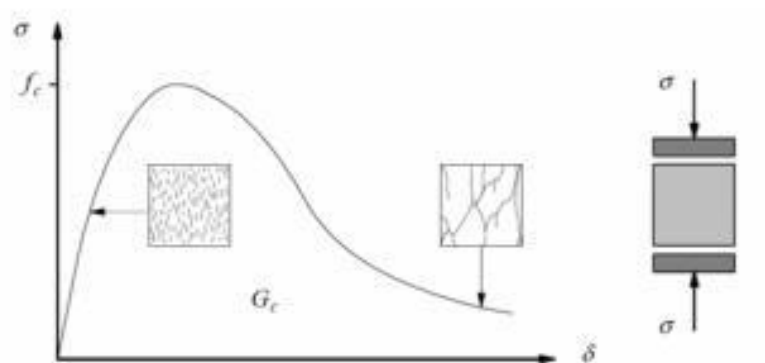


Figura 18 - Comportamento de espécimes de pedra submetidos a ensaio de compressão [26].

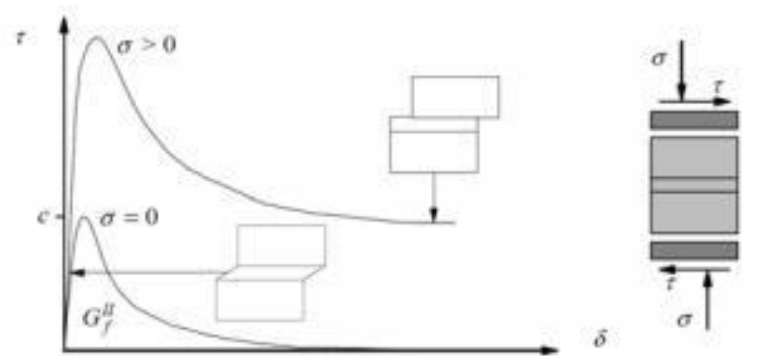


Figura 19 - Comportamento de espécimes de alvenaria submetidos a ensaio de corte [26].

Na sua generalidade, constata-se a existência de amolecimento nas curvas principais da alvenaria, que se traduz numa diminuição da resistência quando o material se encontra sujeito a um aumento contínuo de deformação. Tal fenómeno é detetável nas alvenarias nos referidos ensaios de rotura por tração, de compressão e de corte, sendo a perda capacidade resistente associada à propagação de micro-fendas aquando da aplicação de um carregamento [26].

6.2.2. Argamassas

As argamassas utilizadas na ligação das camadas de assentamento da alvenaria e das camadas de regularização de rebocos de paredes resultavam da mistura de “barro”, areia-da-terra e água, podendo ou não ser adicionada cal apagada. O respetivo “barro” caracterizava-se por um leque alargado de materiais, provenientes de jazidas do solo ou ainda de argilas associadas a siltes, a solos pomíticos ou ainda pozolanas. Estas argamassas possuíam uma grande resistência por terem uma presa lenta, sendo por vezes adicionadas à mistura pelo de crina de vaca ou cabelos humanos, com o objetivo de conferir um bom comportamento à tração e contribuir na redução da fissuração por retração [24].

Posteriormente na Tabela 6 pode-se observar os diversos tipos de argamassas utilizados nas construções da Região.

Tabela 6 - Tipos de argamassas [3].

Tipo	Constituição	Aplicação
Ligação	Barro, areia-da-terra e água. Ocasionalmente cal apagada.	Reboco de paredes, execução das "camas", do encascado. Preenchimento de alvenarias.
Gordas (presa lenta, grande resistência)	Barro, areia, cal viva e óleo (baleia, linhaça ou azeite). Ocasionalmente pozolanas.	Refachamento de juntas.
Revestimentos	Cal e areia. Por vezes cabelo ou crina.	Fasquiados dos tabiques e rebocos.

6.2.3. Madeira

Atualmente nos Açores, assim como em Portugal Continental, a madeira é utilizada essencialmente para fins não estruturais e em estruturas provisórias, no entanto em anos passados foi bastante utilizada como material estrutural em pavimentos e coberturas antes da generalização da construção dos edifícios em betão armado, tal como se encontra ilustrado na Figura 20.



Figura 20 - Madeira como elemento estrutural, pavimento [31].

A madeira foi um elemento extremamente importante nas construções desta Região e não só, tendo sido o principal a pedra, já descrita anteriormente. Com este material executavam-se, e ainda hoje se executam, variados elementos estruturais, tais como: coberturas, pavimentos e restantes elementos não estruturais como portas, ombreiras, vergas, rodapés e escadarias. As espécies mais utilizadas na construção tradicional era a acácia, o eucalipto, o cedro, a faia-da-terra, a faia-do-norte, o zimbros e o pinho, sendo a criptoméria a predominante nas construções mais recentes [3].

Tecnicamente este material permite uma melhor distribuição das forças sísmicas pelos elementos verticais, no entanto não consegue garantir a indeformabilidade do piso. Naturalmente, cada espécie de madeira apresenta particularidades e mesmo dentro da mesma espécie as características variam. No entanto, a identificação da espécie constitui um aspeto essencial para estimar as características mecânicas da madeira [26].

Para tal, um aspeto relevante que pode ou não influenciar a deformabilidade e resistência deste material tem a ver com a sua orientação, visto que a madeira é um material anisotrópico com direções preferenciais consoante o esforço que se pretende resistir. Este material apresenta maiores resistências e conseqüentemente menores deformabilidades quando solicitado por tensões paralelas ao fio da madeira, ou seja, direção do eixo da árvore [25]. Na Figura 21, pode-se observar diferentes tipos de fios que podem ocorrer face à carga aplicada.

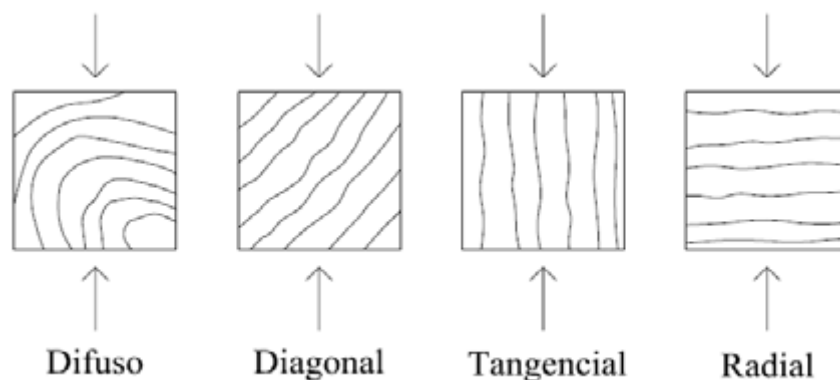


Figura 21 - Orientação do fio da madeira face à carga aplicada [25].

Em relação ao património religioso as espécies mais utilizadas eram importadas, sendo geralmente o Pinho Bravo. As suas seções podiam ser aparelhadas ou não, verificando-se, em alguns casos, a utilização direta dos troncos, sem qualquer preocupação da regularização da geometria da sua seção transversal [24], sendo utilizada nas igrejas nomeadamente nas coberturas, pavimentos entre pisos, portas, rodapés e escadarias.

Em relação ao Pinho Bravo existem valores de referência das suas características mecânicas, na Tabela seguinte apresentam-se as suas propriedades mecânicas.

Tabela 7 - propriedades mecânicas do Pinho Bravo [13].

Designação	Densidade (12% Hum.)	Classe de Resistência	Tensão de Ruptura (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)	Tipo
			Compressão	Tração		
Pinho Bravo	0,53	C18	18	11	6000	Resinosa

6.2.4. Telhas Regionais

As telhas regionais, caracterizadas pela sua forma em canudo, são constituídas por “barro” e argila. São elementos com uma fraca resistência mecânica, pesados e com grande porosidade. Através da sua geometria consegue-se conferir ao telhado uma melhor capacidade para se adaptar aos empenos da estrutura de madeira da cobertura, assim como um melhor comportamento à ação dos ventos intensos [24]. Apesar do referido elemento ter a desvantagem de ser pesado, tem a grande vantagem do seu peso melhorar de uma forma considerável o seu desempenho sob a ação do vento (ver Figura 22).



Figura 22 - Telha canudo [21].

6.3. Sistemas Construtivos

Tipicamente as igrejas de alvenaria eram construídas por um corpo principal com uma nave central e duas laterais de menores dimensões (Figura 23), com a zona do altar situada no prolongamento da nave central.

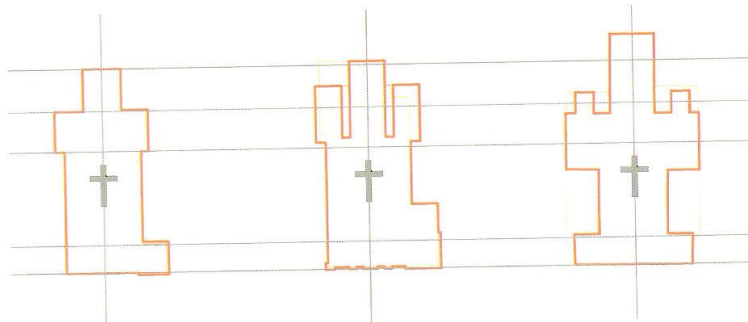


Figura 23 - Distribuição em planta das Igrejas [21].

A estrutura do corpo principal era constituída por um sistema de arcos orientados segundo as direções transversais e longitudinais. As coberturas eram de madeira, apresentando por vezes revestimento interior em estuque, assim como a existência de tirantes. No topo da fachada a maioria das igrejas apresentava um frontão de dimensões significativas. Havia ainda as igrejas constituídas apenas por uma nave, sendo estas de menor dimensão [5]. Na Figura 24 encontram-se ilustradas algumas imagens típicas das respetivas igrejas.



Figura 24 – Imagens típicas das Igrejas açorianas [21].

Todas as igrejas apresentavam pelo menos uma torre que, no caso das igrejas antigas de alvenaria, se encontrava ligada ao corpo principal, apenas com a exceção de uma igreja. Várias combinações de localizações das torres foram observadas, estas foram: uma só torre centrada na fachada, uma torre lateral ou duas torres enquadrando a fachada. Na sua generalidade apresentavam ainda paredes exteriores constituídas por blocos de alvenaria irregulares [5]. Na Figura 25 podem-se observar vários esquemas das igrejas das Ilhas do Faial e Pico.

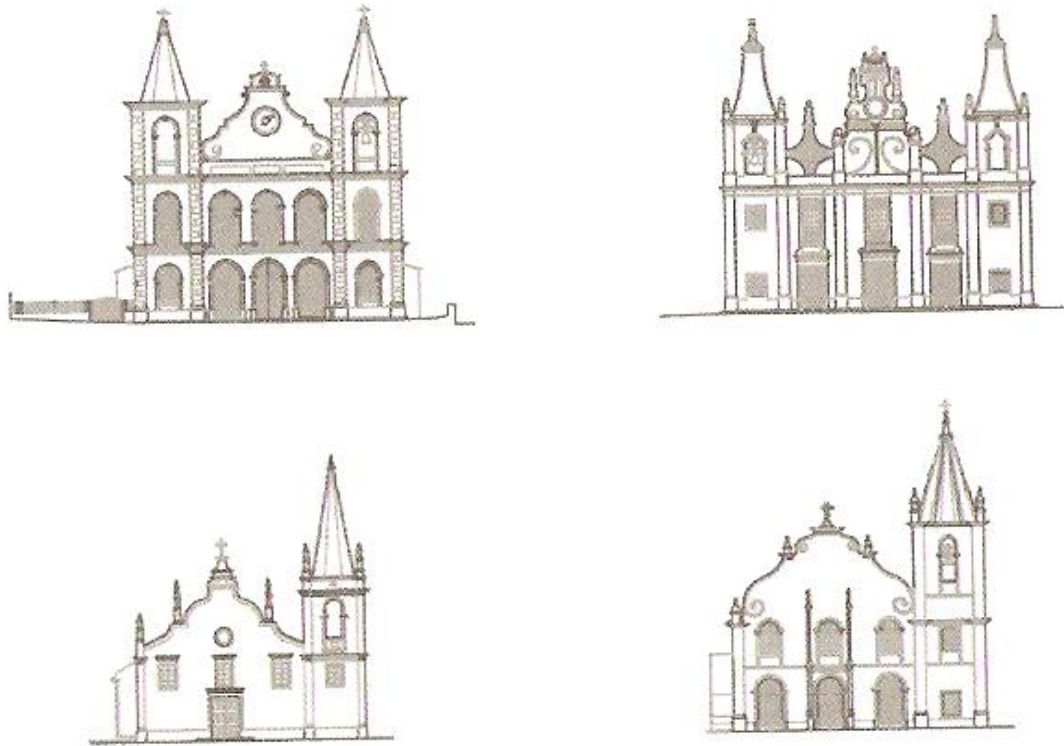


Figura 25 - Esquemas de várias igrejas das Ilhas do Faial e Pico [21].

6.3.1. Fundações

Existem dois tipos de fundações frequentes, estes são as fundações dos cunhais e as fundações que suportam as paredes. As primeiras caracterizam-se por possuírem sapatas executadas em pedra de melhor qualidade, de forma e dimensões pouco apropriadas para serem utilizadas em paredes de elevação, sendo dispostas alternadamente em duas direções perpendiculares periféricamente, de modo a que a parte central seja preenchida com pedra, cascalho e “barro”. Em relação às fundações que suportam as paredes estas são executadas através da abertura de caboucos, geralmente entre 0.30 a 0.40m de profundidade e largura igual à da parede ou um pouco maior, sendo posteriormente preenchidos com alvenaria de características semelhantes à da parede [3, 24].

Havia ainda a situação da cave, quando existia a necessidade desta ser executada eram construídos muros de suporte na parede da mesma, sendo o seu processo construtivo idêntico ao das outras paredes, no entanto eram disposto “travessões” de modo a encastrar o terreno próximo [24].

6.3.2. Paredes Exteriores

As paredes de alvenaria exteriores são elementos fundamentais de qualquer tipo de construção, sendo caracterizadas por constituírem elementos construtivos verticais de seção retangular alongada, servindo como suporte do vigamento e da cobertura da construção, ocorrendo no caso do património religioso a frequente a utilização de grandes vãos.

Existem variados tipos de construção de alvenaria de pedra na construção açoriana, dependendo da capacidade económica e da localização da estrutura, estes podem ser [24]:

- a) Alvenaria de pedra irregular: construídas com pedras de vários tipos de tamanhos e em várias formas, dispostas aleatoriamente, executadas de diferentes maneiras e utilizando como ligante argamassas com várias características;
- b) Alvenaria de pedra de junta seca: constituídas normalmente por pedras de dimensões regulares em paredes que se caracterizam por não possuírem as juntas argamassadas;
- c) Alvenarias de duas folhas: realizadas com duas paredes de revestimento exterior, sendo o espaço entre elas preenchido com material de pior qualidade (pedra miúda, “barro” e cal, solo e outros materiais). Estas paredes são executadas com pedras escolhidas, de comprimento ligeiramente superior a meia espessura da parede colocadas de forma imbricada e a ligação das duas folhas é feita com “travessões” ou “ligadoudoros”, colocados na direção perpendicular e alternando em camadas sucessivas, Figura 26;

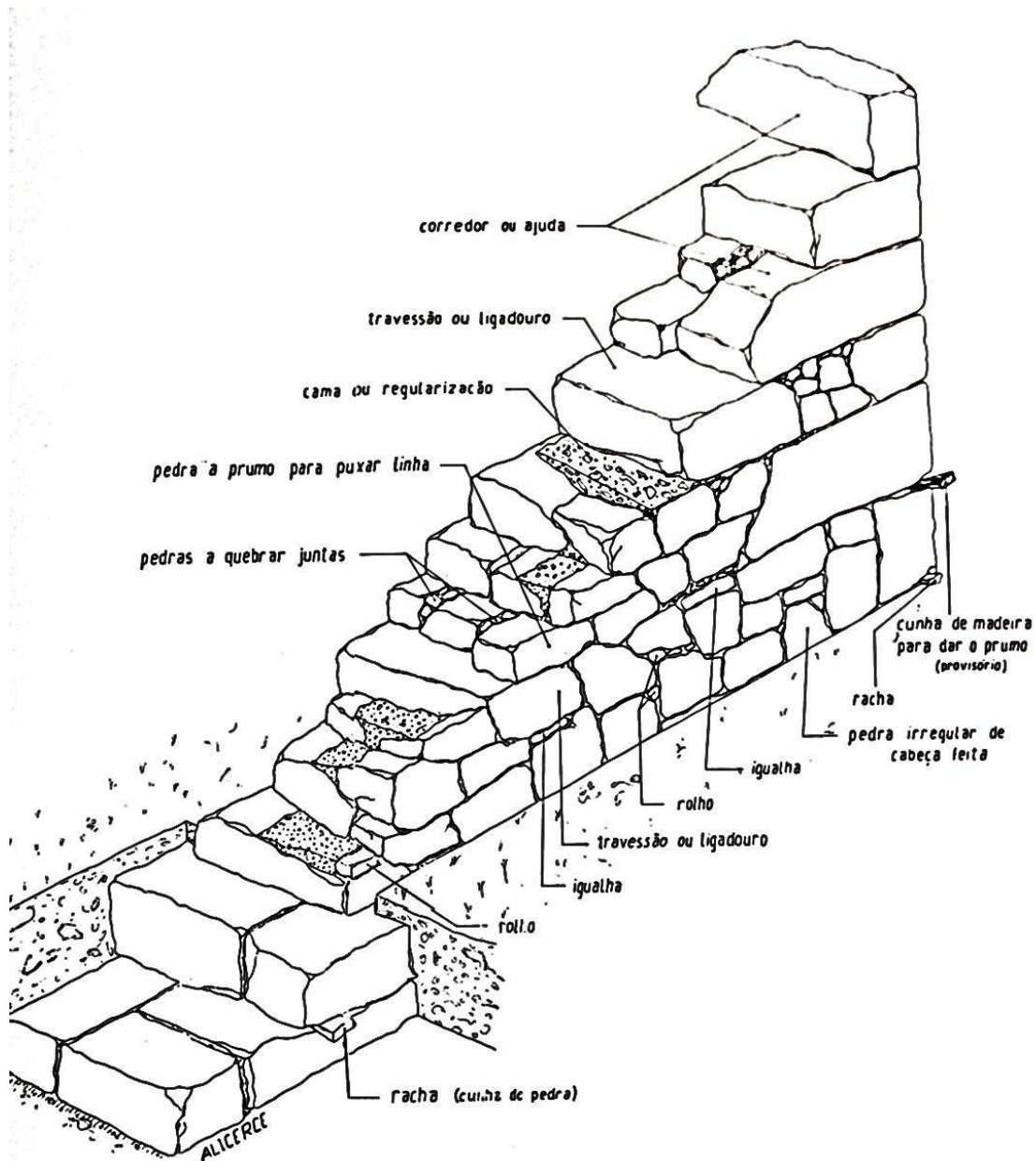


Figura 26 - Esquema de parede de alvenaria de duas folhas, com pedra escolhida [24].

d) Alvenaria de pedra de boa qualidade, constituída por pedra bastante regular, frequentemente com pedras de aresta retilínea ou faces paralelas e com resistência adequada.

O tipo de parede de alvenaria de pedra mais usual na construção açoriana é o de duas folhas (Figura 24), com espessura entre 0.65 e 0.70m, sendo o revestimento da mesma executado com diversas espécies de reboco, sendo os mais comuns compostos por uma mistura de “barro” e cal ou com uma proporção de 1 de cimento para 3 de areia, adicionando-se normalmente cinzas vulcânicas, sendo posteriormente sobre este aplicada uma argamassa de cal e areia. Em relação à pedra de melhor qualidade, esta é utilizada nas ombreiras, padieiras,

cunhais, cornijas, etc [3,24]. Na Figura 27 pode-se observar algumas imagens de alvenaria de pedra após a ocorrência do sismo de 9 de julho de 1998.



Figura 27 – Imagens de alvenaria de pedra após o sismo [21].

6.3.3. Paredes Divisórias Interiores

As paredes divisórias interiores são elementos de fraca resistência e rigidez, no entanto desempenham uma função estrutural resistente de elevada importância perante a ocorrência de um sismo devido à sua fraca resistência. Permitem também contribuir para o contraventamento global da estrutura devido à sua baixa rigidez que possuem, pois permitem alguma resistência à flexão das alvenarias no sentido exterior/interior [24]. Encontra-se na Figura 28 um exemplo de uma parede divisória interior danificada pelo sismo.



Figura 28 - Parede divisória interior danificada [21].

6.3.4. Paredes Mestras Interiores

As paredes-mestras interiores são paredes com espessura idêntica à das paredes exteriores, utilizam-se como elementos de suporte no rés-do-chão e menos usualmente no 1º piso. As construções de dois pisos e com plantas de grande dimensão dispõem também de paredes-mestras que dividem o edifício longitudinalmente [3].

6.3.5. Pavimentos

Em relação aos pavimentos, estes são constituídos por soalho e vigas de madeira, sendo a estrutura formada pelas vigas, espaçadas de 0.50 a 0.20m e encastradas nas paredes de alvenaria de pedra, permitindo assim vencer vãos de 3.5 a 5.5m, nestas apoiam ainda os barrotes, que por sua vez suportam o soalho constituído por tábuas. As vigas de madeira encastram cerca de 0.25m nas paredes e não se encontram ligadas a nenhum elemento de travamento da mesma, sendo fundamental que as vigas de suporte dos pavimentos ultrapassem a espessura das paredes e fiquem ancoradas na face exterior, para uma melhor resistência ao sismo [3], na Figura 29 pode-se observar um exemplo de um pavimento utilizado no património religioso.

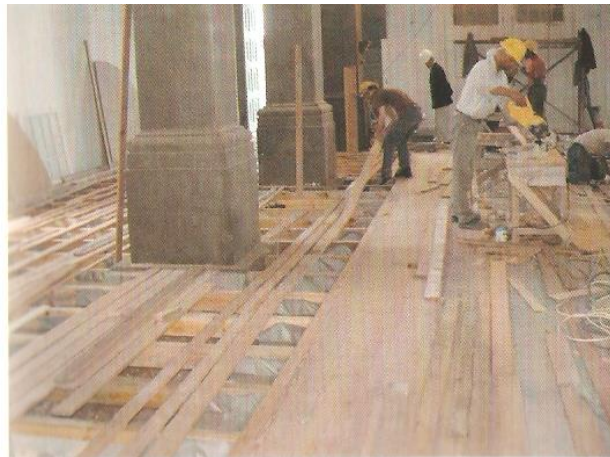


Figura 29 – Pavimento utilizado no património religioso dos Açores [3].

6.3.6. Cobertura

A estrutura de suporte da cobertura é constituída por elementos de madeira, Figura 30, que apoiam nas paredes exteriores, sendo a parte superior varas ligadas no cume umas às outras e na parte inferior apoiadas no frechal, que por sua vez apoia nas paredes exteriores. O respetivo frechal encontra-se em todo o coroamento da parede e funciona como uma vigacinta, sendo ligado entre paredes por vigas de madeira que correspondem a tirantes

permitindo equilibrar as forças horizontais transmitidas pela cobertura ao frechal e são de seção variável. Sendo ainda assentes sobre a estrutura de suporte varas de madeira e sobre estas é fixado o forro de tábuas em que assenta a telha regional de canudo [24].



Figura 30 – Exemplo de uma cobertura recuperada após o sismo e durante a recuperação [21].

6.3.7. Cunhais

Os cunhais são elementos estruturais com boas características de resistência, contribuindo de uma forma significativa para um melhor comportamento da estrutura, quer a cargas verticais como para ações sísmicas nas duas direções horizontais, devido à ligação que os mesmos estabelecem entre as paredes ortogonais e a sua colocação muito cuidadosa. Esta ligação no canto da construção é executada com recurso a uma densidade superior de pedra aparelhada com forma paralelepípedica. Os cunhais mais simples são constituídos por cantarias dispostas alternadamente nas duas direções ortogonais e devidamente apumadas, tal como se pode observar na Figura 31. Sendo ainda muito comum a utilização de travamentos [24].

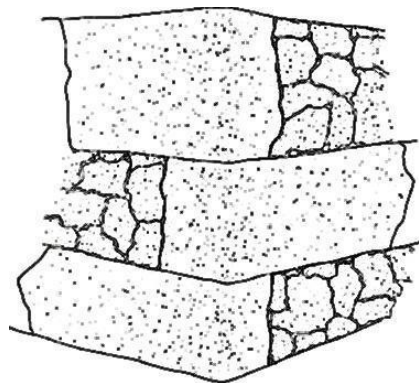


Figura 31 - Representação esquemática de um cunhal com travamento [24].

6.3.8. Vãos

A transição entre as paredes e os vãos era efetuada com elementos especiais de pedra mais resistentes, tais como: ombreiras, vergas e peitoris, pois visam conferir um maior confinamento à alvenaria e podem ser monolíticos ou constituídos por duas ou três peças. Salienta-se que também eram utilizadas algumas vergas em madeira, mas não era uma situação muito comum [24], na Figura 32 encontra-se ilustrado um exemplo deste tipo de vãos.



Figura 32 - Imagem dos vãos utilizados no Património Religioso [21].

6.3.9. Arcos

As paredes-mestras interiores apresentam no piso térreo aberturas em arco, os quais aparecem isolados ou em grupos de dois e três, para permitir a circulação e dar continuidade estrutural às paredes de alvenaria. A maioria dos arcos é de volta inteira, aparecendo esporadicamente arcos abatidos [3], tal como se pode observar na Figura 33.



Figura 33 - Imagem do tipo de arcos no Património Religioso [21].

6.4. Conclusão

O património religioso das Ilhas do Faial e Pico é composto por catorze igrejas na Ilha Faial e treze na Ilha do Pico. Perante a ocorrência do sismo de 9 de julho de 1998 oito das igrejas não sofreram danos permitindo uma utilização imediata, pelo contrário três delas sofreram colapso eminente levando a uma impossível utilização. Em relação às restantes, algumas sofreram danos importantes podendo ser utilizadas apenas depois da sua reparação e outras tiveram também utilização imediata por terem sofrido apenas danos ligeiros.

No geral este património era construído com materiais de melhor qualidade e com recurso a técnicas construtivas especiais, pois só assim tornava-se possível vencer elevados vãos a grandes alturas interiores e elementos estruturais extremamente esbeltos. Perante tais características e particularidades construtivas, estes edifícios tornam-se numa elevada vulnerabilidade.

Todo o tipo de materiais utilizados nestas estruturas eram materiais presentes na própria região, tais como: a pedra, a argamassa nas paredes, a madeira nas coberturas e pavimentos e as telhas regionais também nas coberturas.

A pedra é o material predominante, nomeadamente a basáltica, devido à sua abundância, às suas diversas aplicabilidades e à sua resistência, sendo frequente especialmente em alvenaria das paredes. Em relação às argamassas, estas eram utilizadas na ligação das camadas de assentamento da alvenaria e das camadas de regularização de reboco de paredes, resultando de uma mistura de “barro”, areia-da-terra e água, podendo ou não ser adicionada cal apagada.

Já a madeira foi o segundo elemento de grande importância nas construções desta Região, executando-se com a mesma variados elementos estruturais, tais como: coberturas, pavimentos e restantes acabamentos como portas, ombreiras, vergas, rodapés e escadarias, sendo o Pinho Bravo o mais utilizado no Património Religioso.

Por último, as telhas são elementos de fraca resistência mecânica, pesados e com grande porosidade. Pela sua geometria torna-se possível conferir ao telhado uma melhor capacidade para se adaptar aos empenos da estrutura, assim como um melhor comportamento face a ação dos ventos intensos, tal como o seu peso que permite também melhor de uma forma considerável o seu desempenho sob a ação do vento.

As Igrejas eram construídas por um corpo principal com uma nave central e duas laterais de menores dimensões, sendo a zona do altar situada no prolongamento da nave central. Em relação à estrutura do corpo principal esta era constituída por um sistema de arcos orientados segundo as direções transversais e longitudinais. No topo da fachada a maioria das igrejas apresentava um frontão de dimensões significativas. Todas as igrejas apresentavam pelo menos uma torre que se encontrava ligada ao corpo principal.

Os vários sistemas construtivos aplicados nestas estruturas são: fundações, paredes exteriores, paredes divisórias interiores, paredes-mestras interiores, pavimentos, coberturas, cunhais, vãos e os arcos.

Análise dos Danos Ocorridos nas Igrejas

7.1 Considerações Gerais

Uma das grandes causas de danos graves e perda de património religioso dos Açores são os sismos, sendo qualquer intervenção de reabilitação das respetivas estruturas uma ação de grande responsabilidade, devendo haver uma cuidada avaliação e análise da sua vulnerabilidade sísmica, de forma a desenvolver, quando necessário, estratégias de reforço sísmico adequadas. Para tal, torna-se indispensável a realização de um diagnóstico e registo do grau de dano em igrejas após a ocorrência de um sismo, assim como para a avaliação da vulnerabilidade associada a estas.

Tal como já foi referido anteriormente os monumentos históricos eram, em geral, construídos com materiais de melhor qualidade e recorrendo a técnicas construtivas especiais, permitindo assim vencer elevados vãos a grandes alturas interiores e elementos estruturais extremamente esbeltos. As características e particularidades construtivas destes edifícios traduzem-se numa elevada vulnerabilidade, incomparável à dos edifícios correntes.

As igrejas são testemunhos vulgares bem referenciados e documentados do património monumental, com a particularidade de terem sofrido ao longo da sua história e, nalguns casos superado, violentos terramotos como se tivessem sido submetidas a autênticos ensaios sísmicos à escala real. A sismicidade do Arquipélago dos Açores, que decorre da atividade vulcânica e tectónica da crista Atlântica, é caracterizada por eventos com um número de sismos muito elevado.

As metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica de igrejas têm vindo a ser desenvolvidas, atualizadas e aperfeiçoadas pelo conhecimento adquirido nos diversos eventos

que todas as igrejas possuíam coro alto e que, na sua maioria, apresentavam danos relacionados com o comportamento sísmico dos macro-elementos ilustrados na Figura 35 [27].

Foram ainda realizados outros tipos levantamentos, como por exemplo a equipa do Instituto Superior Técnico que realizou uma inspeção bastante abrangente ao património religioso das ilhas do Faial e do Pico, tendo constatado que a maioria era de construção antiga de alvenaria de pedra, existindo também algumas de construção mais recente, com estrutura resistente de betão armado [24].

A análise realizada teve maior enfoque nos potenciais mecanismos de colapso, tais como: movimento de paredes para fora do plano, movimento dos arcos longitudinais e transversais, rotura de colunas, abertura de fendas de grande dimensão e queda de elementos de fachada, [24]

Perante tal consequência, após a ocorrência de um sismo, o estudo do macro-elemento coro alto é de extrema relevância, devido aos danos que resultam da sua interação também com a restante estrutura, como por exemplo, paredes laterais, arcarias que suportam esta estrutura ou mesmo interação com a fachada.

Após a observação de vários danos associados ao macro-elemento referido anteriormente levou à introdução de um novo mecanismo de dano, o 29, tal como ilustra a Figura 35.

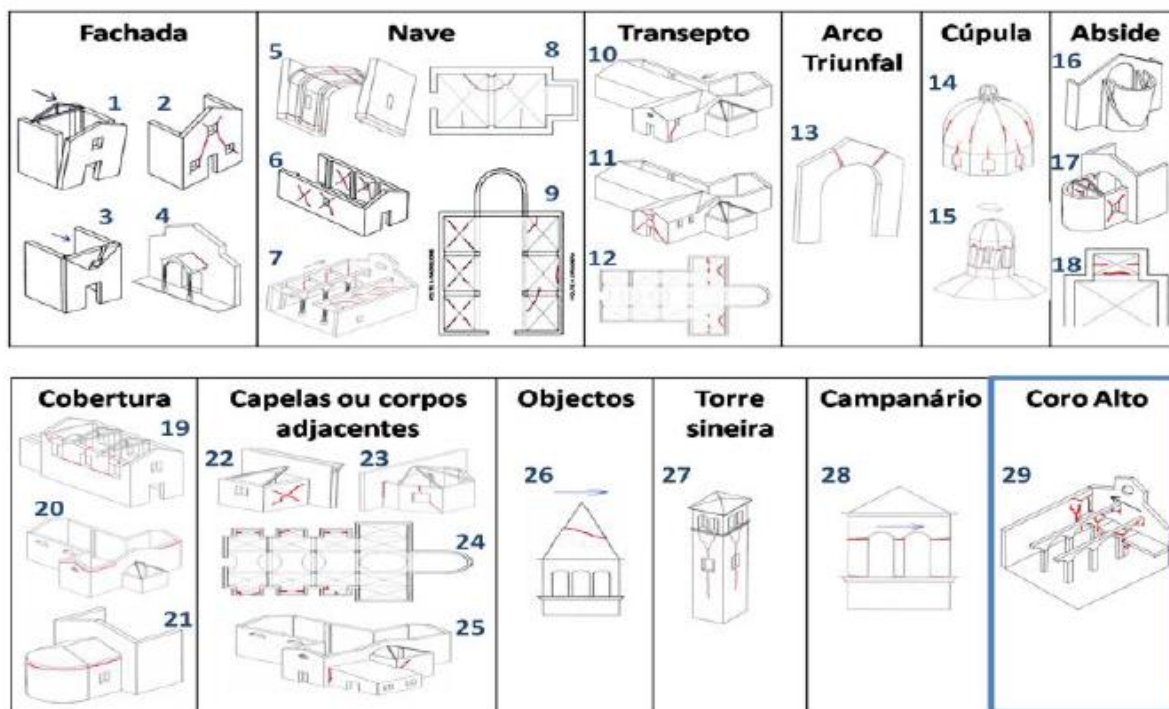


Figura 35 - Mecanismos de Dano [27].

Posteriormente passa-se a descrever os métodos utilizados no levantamento de dano e na avaliação da vulnerabilidade das igrejas das Ilhas do Faial e Pico, assim como todos os mecanismos de dano verificados após a ocorrência do sismo de 1998.

7.2.1. Ficha de Levantamento de Dano e Avaliação da Vulnerabilidade das Igrejas

A metodologia desenvolvida pelo GNDT às igrejas das Ilhas do Faial e Pico, foi executada com o auxílio de uma ficha de levantamento de danos e avaliação da vulnerabilidade sísmica, tendo como base a ficha apresentada pelo *Ministero dei Beni Culturali e dei Lavori Pubblici*. Esta é dividida em três partes distintas, em que a primeira dedica-se ao conhecimento geral da estrutura, contendo informações tais como: identificação da igreja, localização, dados históricos sobre a época de construção e transformações sofridas ao longo dos anos, características geométricas e propriedades dos materiais dos elementos que a constituem, registo fotográfico entre outros dados relevantes para uma análise detalhada da estrutura. Na segunda parte é feita a classificação dos diferentes mecanismos de dano observados, assim como a avaliação da vulnerabilidade da igreja associada a cada mecanismo. Já a terceira parte corresponde ao cálculo do índice de dano (I_d), índice de vulnerabilidade (I_v) e índice de segurança (I_s) [29].

A segunda parte é responsável pelo registo de todos os mecanismos de dano observados assim como pela avaliação quanto à sua gravidade, em que cada dano é classificado de 0 a 5, sendo “0” referente à ausência de dano e “5” ao colapso do elemento. O modo de dano está previamente definido para grande parte dos mecanismos caracterizando o modo de dano que poderá ser do tipo I, correspondente ao comportamento das paredes para fora do plano, ou do tipo II sendo a resposta das paredes é no próprio plano, geralmente por corte e flexão. Existe ainda indicador da influência do dano no edifício para cada mecanismo de dano, este é designado por coeficiente ρ_k , sendo este valor entre 0,5 e 1, variando consoante a sua relevância na estrutura em estudo, o valor 1 ocorre quando o elemento é considerado de elevada importância e 0,5 quando pouco importante [29].

Por último a avaliação da vulnerabilidade, é efetuada tendo em conta dois parâmetros que devem ser classificados, estes são: v_{kp} que representa as soluções tecnológicas ou construtivas que podem atenuar o aparecimento do mecanismo em questão e v_{ki} que representa a lista de situações ou fragilidades construtivas que possam favorecer a ativação do mecanismo de dano em avaliação. Estes são classificados de 0-3, em relação à sua eficácia, ou relevância no aparecimento do mecanismo de acordo com o manual de preenchimento desenvolvido *Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.)* [29].

Para tal foram definidas algumas regras de classificação dos parâmetros mencionados anteriormente associados à vulnerabilidade para o coro alto (mecanismo 29), tais como condições de suporte, tipologia da estrutura, grau de ligação do coro alto com outros macro-elementos, número e dimensão de aberturas de portas e janelas nas paredes laterais, assim como outros pormenores construtivos ou elementos de reforço existentes que possam influenciar a resposta do macro-elemento perante a ação sísmica. Na Figura 36 pode-se verificar os mecanismos mais observados nas igrejas danificadas pelo sismo de 0 de julho de 1998 [27].

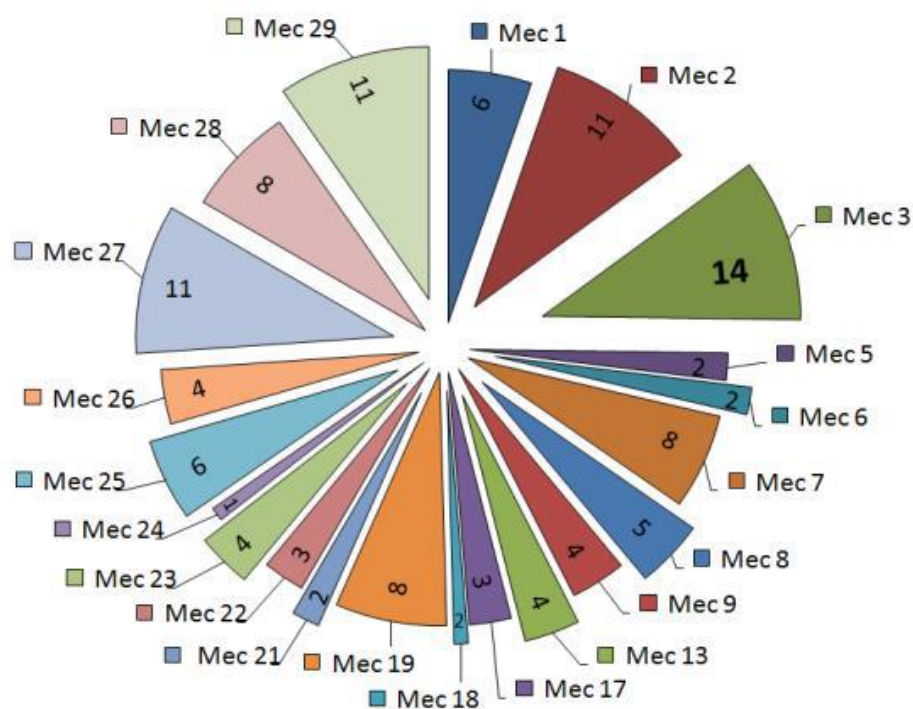


Figura 36 - Estatística dos danos observados nas igrejas dos Açores após o sismo de 9 de Julho de 1998 [29].

Ao observar o gráfico apresentado na Figura 36, pode-se concluir quais as zonas mais delicadas deste tipo de estruturas, pois verifica-se que o mecanismo 2 (rotação do topo da fachada para fora do plano), mecanismo 3 (fissuração por ação de corte na fachada), mecanismo 7 (nave), mecanismo 19 (cobertura), mecanismo 27 (fissuração nas torres sineiras), mecanismo 28 (campanário) e o mecanismo 29 (danos no coro alto) são os mais frequentes.

Após a identificação e classificação das igrejas quanto aos danos observados e à vulnerabilidade associada a cada macro-elemento, segue-se a terceira parte da ficha de levantamento. Esta tem como objetivo calcular o índice de dano (I_d), índice de vulnerabilidade (I_v) e índice de segurança (I_s), automaticamente através das expressões mencionadas posteriormente, tendo em conta todos os mecanismos, incluindo o novo, 29.

7.2.1.1. Cálculo do índice de dano, índice de vulnerabilidade e índice de segurança

De seguida passa-se a calcular o índice de dano (I_d), índice de vulnerabilidade (I_v) e o índice de segurança (I_s) relativamente aos danos observados e à vulnerabilidade associada a cada macro-elemento mencionado anteriormente.

Para o cálculo do índice de dano utiliza-se a seguinte expressão:

$$I_d = \frac{1}{5} \times \frac{\sum_{k=i}^{29} \rho_k \times d_k}{\sum_{k=i}^{29} \rho_k}$$

Equação 2 - Expressão para cálculo do índice de dano [27].

Onde:

- ρ_k é a importância atribuída ao mecanismo;
- d_k corresponde ao nível de dano relativo ao k-ésimo mecanismo (0 a 5);

Torna-se importante referir que o valor do índice de dano varia entre 0 e 1 e, segundo o documento original de referência, considera-se que para valores superiores a 0,3 a igreja não reúne as condições mínimas de segurança necessárias à sua utilização [27].

Em relação ao índice de vulnerabilidade, este é calculado através da seguinte expressão:

$$i_v = \frac{1}{6} \times \frac{\sum_{k=i}^{29} \rho_k \times (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=i}^{29} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

Equação 3 - Expressão para o cálculo do índice de vulnerabilidade [27].

Onde:

- v_{ki} corresponde à lista de limitações ou defeitos construtivos que possam favorecer a ativação do mecanismo de dano;
- v_{kp} corresponde às soluções tecnológicas ou disposições construtivas que podem minimizar o aparecimento do mecanismo.

Por fim, o índice de segurança é calculado da seguinte forma:

$$I_s = \frac{a_{ELU}}{\gamma_1 \times S \times a_{grR}}$$

Equação 4 - Expressão para o cálculo do índice de segurança [27].

Onde:

- γ_1 é o fator de importância da igreja;
- S é o fator amplificativo do solo para a zona sísmica em análise;
- a_{gr} é aceleração de referência do solo para a zona sísmica em análise;
- a_{ELU} é aceleração do solo em relação ao estado limite último, pela expressão:

$$a_{ELU} = 0.025 * 1.8^{5.1-3.44 \cdot i_v}$$

Equação 5 - Expressão para o cálculo da aceleração do solo em relação ao estado limite último [27].

Executada a ficha de levantamento de dano e avaliada a vulnerabilidade das igrejas afetadas pelo sismo de 9 de Julho de 1998 obtiveram-se os resultados exposto na Figura 37.

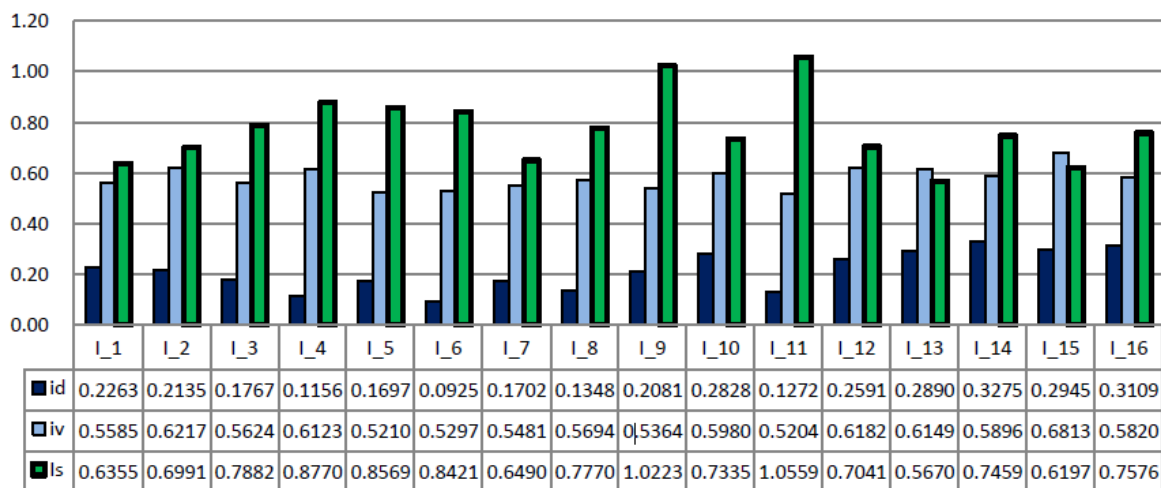


Figura 37 - Valores obtidos na avaliação das igrejas [27].

Ao observar o gráfico constata-se que o valor do índice de dano é relativamente baixo na grande maioria das igrejas, em que em apenas dois casos este ultrapassa 0,3 e em um caso encontra-se muito próximo do referido valor, o que significa que estas igrejas não reúnem as condições de segurança para serem utilizadas. Pois tal como já foi mencionado anteriormente, as igrejas ficam sem condições de utilização quando o valor do índice de dano ultrapassa o valor limite, 0,3. Relativamente às restantes igrejas, na sua generalidade sofreram danos ligeiros, e algumas delas danos importantes com utilização apenas após a sua reparação.

Em relação ao índice de vulnerabilidade pode-se verificar que este na generalidade apresenta um valor elevado, ou seja, entre 0,5 e 0,7, visto que o seu limite é 1.

Por fim, o índice de segurança na grande maioria dos casos apresenta valores inferiores à unidade, tal acontecimento significa que as igrejas em análise não estariam em condições de suportar um sismo com a aceleração de referência ponderada, sendo a aceleração de referência correspondente à região em causa, assim como os resultados obtidos dependentes dos valores admitidos para o fator amplificativo do solo e o fator de importância.

De seguida passa-se a descrever os mecanismos de dano mais frequentes mencionados anteriormente, resultantes do sismo em estudo.

7.3. Comportamento Sísmico e Mecanismos de Dano mais Frequentes ocorridos no Património Religioso após o sismo de 1998

7.3.1. Alvenaria Estrutural de Pedra (Mecanismo 1, 2, 3, 4)

O estudo do comportamento sísmico de construções de valor patrimonial existentes deve compreender a análise dos processos de construção utilizados nas mesmas, que normalmente possuem soluções construtivas e qualidade muito heterogénea. Essas construções geralmente não possuem características sísmo-resistentes que permitam um bom comportamento da estrutura face à ocorrência de um sismo.

Na avaliação das fragilidades das construções existentes de alvenaria deverá atender-se ao valor patrimonial, à função e à tipologia construtiva. Cada edifício, em função da sua geometria, altura e distribuição de paredes interiores, têm associados mecanismos de comportamento e potenciais fragilidades muito características. Os aspetos que normalmente influenciam a vulnerabilidade das estruturas de construções de alvenaria resistente podem possuir fragilidades associadas ao próprio sistema resistente, tais como [24]:

- a) Qualidade, constituição e morfologia das alvenarias (homogeneidade, forma, dimensão e natureza dos materiais); configuração do assentamento; tipo de ligação transversal entre panos da própria parede;
- b) Distribuição de paredes resistentes e grau de ligação entre paredes ortogonais;

- c) Defeitos construtivos ou deformações excessivas (desaprumo das paredes);
- d) Problemas associados à topografia da envolvente do edifício (pendente excessiva do terreno),
- e) Tipo e consistência do terreno de fundação, funções inadequadas ou fundações adjacentes a diferentes profundidades e ainda impulsos de terras sobre as paredes.

É importante ainda destacar a relevância da disposição e distribuição das paredes resistentes em planta, o travamento das mesmas, particularmente das paredes periféricas das construções, dado que o tipo de ligação entre paredes ortogonais e a distância entre paredes controlam o risco de potenciais mecanismos de colapso fora do plano [24].

Tal como já foi referido anteriormente a maior parte dos edifícios antigos não têm capacidade resistente suficiente perante a ocorrência de um abalo sísmico, devido à falta de regulamentação na altura da sua construção, daí os sismos provocarem várias consequências nas construções, posteriormente passa-se a mencionar as mesmas.

O comportamento sísmico de um edifício, ductilidade de uma estrutura ou elemento é definido como a capacidade de dissipar a energia provocada pelo movimento oscilatório do sismo, sem apresentar deformações excessivas nem perda significativa da capacidade de carga [25].

Os elementos estruturais com maior vulnerabilidade ao sismo são as paredes de alvenaria de pedra, devido à sua a energia que é usualmente dissipada através do atrito nas interfaces da argamassa-pedra. Nas respetivas paredes, quando sujeitas a forças sísmicas, facilmente ocorre a desagregação dos materiais que as constituem, devido ao seu movimento oscilatório, podendo em alguns casos levar ao colapso total da estrutura ou a reduções significativas da sua resistência total. Existem alguns aspetos que contribuem para o efeito da desagregação, estes são: as pedras mais arredondadas que mais facilmente se soltam, a possível fratura das pedras de menor qualidade e as deficiências de argamassa, que por insuficiência de aderência não garante a total união do conjunto [25], na Figura 38 pode-se observar como ocorre a respetiva desagregação.



Figura 38 - Efeito da desagregação da pedra nas alvenarias de pedra [25].

As estruturas de alvenaria quando submetidas à ação sísmica são muito propícias à ocorrência de várias consequências, estas podem ser o colapso da estrutura para fora do plano das paredes (mecanismo 1), devido à deficiente ligação entre as paredes ortogonais exteriores, geralmente relacionado com fenómenos de derrubamento e flexão; quando esta ligação é executada corretamente, o modo de rotura está relacionado com a fendilhação por corte dos panos de alvenaria (mecanismo 3), provocando assim danos no plano da parede [25], na Figura 39 pode-se observar os respetivos danos.

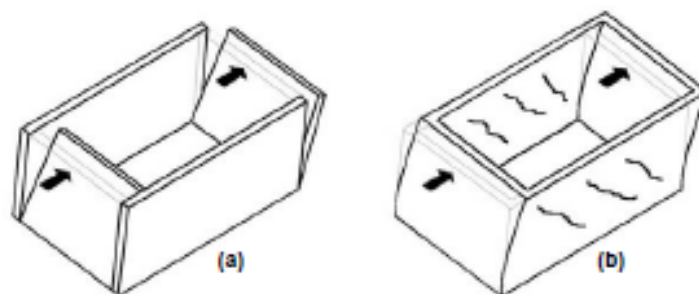


Figura 39 – a) Danos para fora do plano da parede; b) Danos no plano da parede [25].

No caso de deformações para fora do plano da parede, a rotura da parede dá-se por flexão composta. A acumulação de tensões de compressão na interface entre duas paredes de pisos consecutivos pode levar ao esmagamento de material e consequente diminuição da base de apoio da parede superior, resultando no derrubamento da parede [26]. Pode-se observar o respetivo processo na Figura 40.

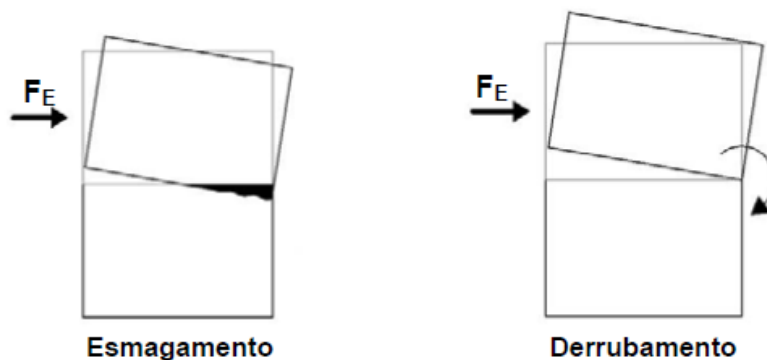


Figura 40 - Mecanismo de ruptura para fora do plano da parede [26].

O derrubamento das paredes para fora do seu plano é um mecanismo de ruptura expectável em muitos edifícios antigos. No entanto, o colapso concentra-se, geralmente, nas fachadas ficando o interior intacto, podendo salvaguardar vidas humanas e minorar prejuízos materiais. Em certos casos o derrubamento das fachadas será suficiente para resultar no abatimento da cobertura ou de pisos superiores, provocando o colapso total da estrutura. Como em qualquer dos casos a possibilidade de recuperação dos imóveis é relativamente reduzida, mesmo que o mecanismo não seja global considera-se que corresponde a um modo de colapso total. Na Figura 39 ilustra-se o mecanismo descrito, mostrando-se que se poderá dar a diferentes níveis. É importante salientar que quanto menos pisos se encontrem acima da charneira de derrubamento, menor é a probabilidade de ocorrência de um colapso global. A Figura 41 ilustra ainda como o derrubamento da parede para fora do seu plano pode arrastar consigo os pisos acima da charneira [26].

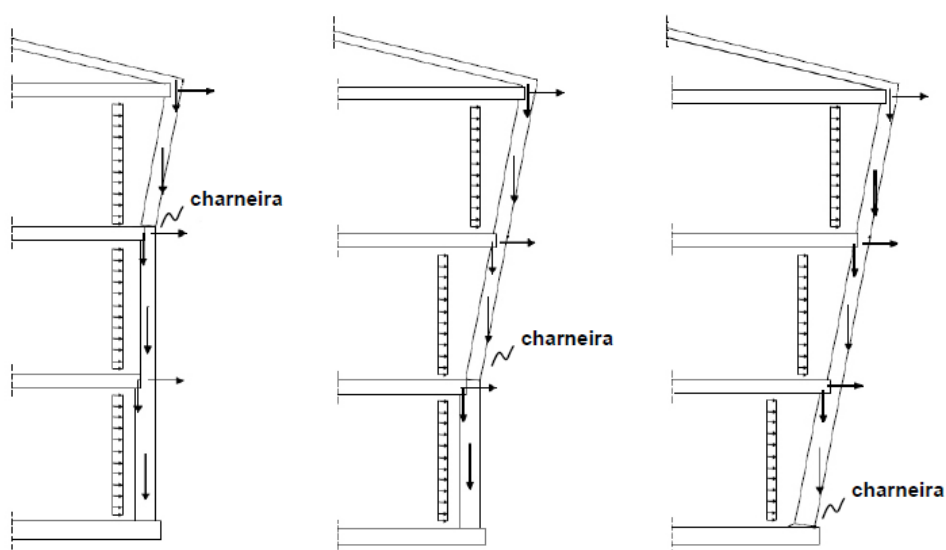


Figura 41 - Mecanismo de derrubamento por flexão composta para fora do plano da parede [26].

Em relação às deformações no plano da parede, a rotura ocorre por corte ou derrubamento. Sendo os mecanismos de rotura por corte os de deslizamento, tal como se pode verificar na Figura 42 b), o de fendilhação diagonal na Figura 42 c), e por fim o mecanismo de rotura por derrubamento que é um mecanismo de flexão composta tal como ilustra a Figura 42 a) [26].

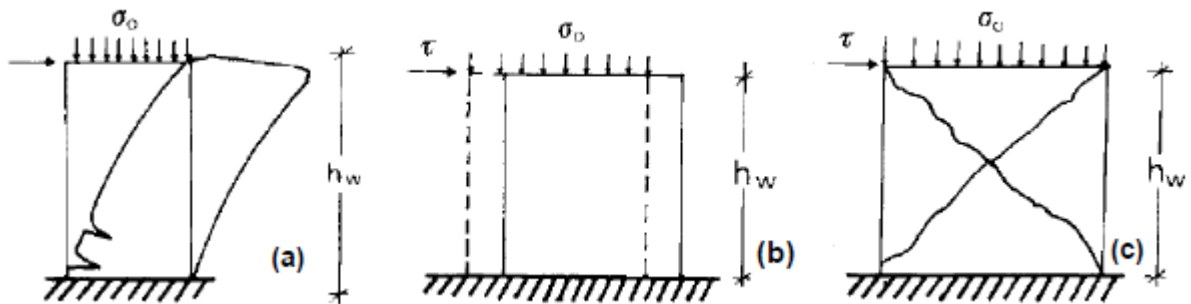


Figura 42 - Mecanismos de colapso no plano da parede: a) Flexão composta; b) Deslizamento; c) Fendilhação diagonal [26].

Existe ainda a possibilidade da ocorrência de um deslocamento relativo grande entre duas superfícies, superior a metade da espessura da parede podendo o deslizamento conduzir ao derrubamento [26], tal como ilustra o esquema representado na Figura 43.

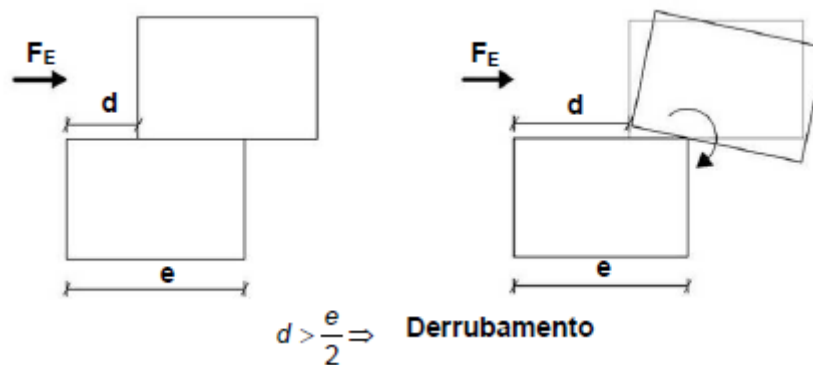


Figura 43 - Mecanismo de deslizamento e consequente derrubamento no plano da parede [26].

Após toda a explicação mencionada anteriormente relacionada com o comportamento sísmico das alvenarias de pedra pode-se observar na Figura 44 algumas imagens do seu comportamento após a ocorrência do sismo de 1998.



Figura 44 - Colapsos na estrutura [10].

Ao analisar as imagens pode-se constatar que os danos consequentes do sismo em análise estão relacionados com o tipo de alvenaria estrutural e o seu sistema construtivo, mencionado anteriormente no Capítulo 6. Estes danos eram na sua maioria o colapso das empenas e dos cantos das paredes, devido à sua deficiente conexão ou ainda o colapso total da estrutura, assim como o colapso das paredes, com deslocamentos substanciais entre as pedras, no entanto, em várias estruturas o telhado ajudou na prevenção do seu colapso total.

Verifica-se também que a causa comum mais grave parece ser bastante clara, ou seja, a generalizada falta de apoio horizontal nos sistemas construtivos, tais como pisos e telhados, que deveriam permitir que as forças horizontais sísmicas fossem distribuídas ao longo de todos os elementos resistentes laterais, nomeadamente as paredes externas, e as ligações entre as paredes deficientes, particularmente nos cantos.

É de notar igualmente idade avançada dos materiais, assim como da construção destas estruturas, tornando-os num estado de degradação elevado, pois a qualidade dos materiais utilizados na época não eram de boa qualidade, bem como as técnicas de construção que não eram de um nível de exigência tão exigente e eficaz como o de hoje em dia, tornando assim as estruturas vulneráveis a este tipo de eventos.

7.3.2. Nave (Mecanismos 5, 6, 7, 8, 9)

O mecanismo 7 é um mecanismo de dano consequente em variadas igrejas após o sismo de 1998, que se traduz no aparecimento de fendas nos arcos ou danos na ligação das abóbadas com o arco, sendo este dano mecanismo típico nas naves das igrejas, podendo ocorrer também esmagamento ou fissuração na base dos capitéis das colunas [29]. Na Figura 45 encontra-se ilustrado o referido mecanismo.



Figura 45 - Fendas nos arcos e danos na ligação das abóbadas com o arco – Mecanismo 7.

Existem ainda os mecanismos 5, 6, 8, e 9, relacionados com os danos ocorridos da nave, que não sucederam com tanta frequência relativamente ao sismo de 1998. No entanto, os respetivos mecanismos caracterizam-se também pela ocorrência de abertura de fendas nos arcos e rotação de paredes laterais levando ao aparecimento de fendas nas abóbadas provocadas pelo esforço transversal (mecanismo 5). Comparativamente ao mecanismo 5, o mecanismo 6 caracteriza-se pela abertura de fendas, mas com uma orientação diagonal e fissuração próxima das descontinuidades das paredes laterais. Em relação aos mecanismos 8 e 9, estes caracterizam-se pela ocorrência de fendilhação, aberturas e descontinuidades nas abóbadas das naves centrais e laterais [29].

7.3.3. Cobertura (Mecanismo 19)

Em relação à cobertura, o mecanismo que ocorreu com uma maior frequência foi o 19, relacionado com a interação entre cobertura e paredes laterais, pois esta é uma zona muito vulnerável da igreja, devido à ação horizontal que origina um efeito impulsivo da cobertura no topo das paredes, tendo como consequência o aparecimento de fendas horizontais e por vezes o movimento das paredes para fora do seu plano [29], Figura 46.



Figura 46 – Interação entre cobertura e paredes laterais – Mecanismo 19.

Os mecanismos 20 e 21, também relacionados com a cobertura, caracterizam-se também pela propagação de fendas, sendo idênticos ao mecanismo 19 [29].

7.3.4. Torres e Campanários (Mecanismo 27 e 28)

Após o sismo de 9 de julho de 1998, com o levantamento efetuado relacionado com os danos observados nas igrejas afetadas pelo referido sismo constatou-se que o campanário das torres sineiras é dos elementos particularmente vulnerável aos sismos, devido à sua geometria típica, assim como as grandes aberturas a certos níveis produzindo elementos verticais muito esbeltos. No entanto, por outro lado, a elevada concentração de massa no topo das torres também contribui para esta vulnerabilidade [27].

O comportamento sísmico de macro-elementos como torres, campanários e outras estruturas altas e esbeltas depende de alguns fatores específicos tais como: a esbelteza da estrutura, o grau de amortecimento das paredes, a presença de estruturas adjacentes mais baixas ou da presença de elementos arquitetónicos esbeltos no topo. Em praticamente todas as igrejas das Ilhas do faial e Pico, com exceção de uma, as torres sineiras encontram-se em contacto com a estrutura principal da igreja, podendo criar limitações horizontais que alteram a resposta dos macro-elementos à ação sísmica. Pois por um lado limita a esbelteza do elemento e por outro constitui uma rigidez localizada ao ponto de provocar a concentração de esforços, causando danos significativos (mecanismo 27) [29], tal como se pode observar na Figura 47.



Figura 47 – Danos resultantes da interação entre torre e corpo principal da igreja, Igreja das Bandeiras [29].

A alteração do comportamento e da resposta da estrutura à ação sísmica, torna também o campanário (mecanismo 28) um elemento particularmente vulnerável à rotura ao corte por escorregamento, devido à existência de grandes aberturas, geralmente constituídas por colunas bastante esbeltas e pouco carregadas [29], Figura 48.



Figura 48 - Danos nos campanários, sismo de 1998: Igreja da Feteira e Bandeiras respetivamente [29].

Os mecanismos de colapso e dano deste tipo de estruturas depende de parâmetros como a geometria e características construtivas. No entanto, com recurso a uma avaliação quantitativa com modelos mecânicos simplificados torna-se possível fazer referência ao colapso por flexão ou considerando as torres como uma consola, solicitada por um sistema de forças horizontais combinadas com o peso próprio, pode causar o esmagamento em zona de compressão, após fendilhação provocada pela ausência de resistência à tração da alvenaria [27].

Através dos levantamentos efetuados [27], executaram-se dois casos de estudo em duas igrejas dos Açores afetadas pelo sismo de 9 de julho de 1998, sendo elas: 1) Igreja de Santa

Maria Madalena e 2) Igreja de Nossa Senhora da Boa Nova em Bandeiras. Sendo na 1 as torres incorporadas e na 2 as torres agregadas ao corpo principal da igreja. Tal situação não difere na aplicação do modelo de cálculo, sendo este igual para ambos os casos, pois apenas é analisada a parte livre das torres. Nas Figuras 49 e 50 podem-se observar as duas igrejas em estudo.

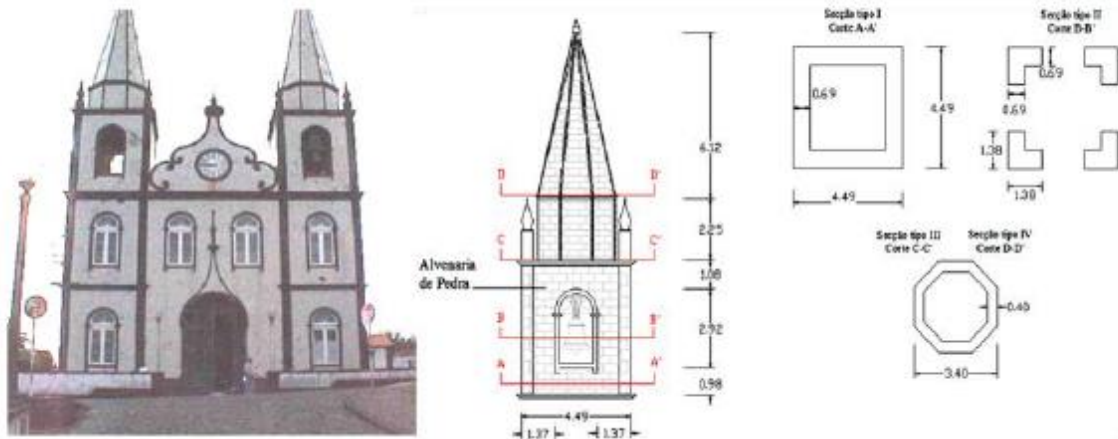


Figura 49 - Igreja e campanário da Madalena [27].

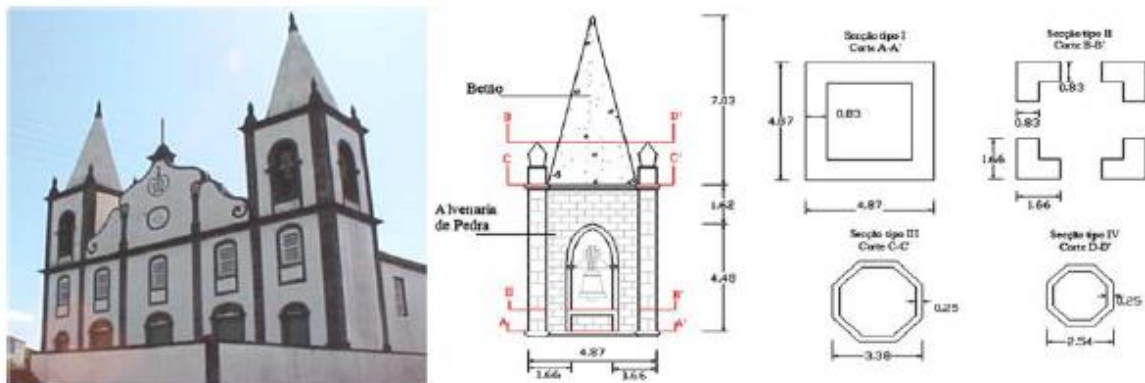


Figura 50 - Igreja e campanário das Bandeiras [27].

Nas duas situações constatou-se que a seção crítica encontra-se na base das colunas da zona do campanário, devido às reduzidas dimensões em planta dos elementos, assim como ao reduzido esforço axial a esse nível, na Figura 51 podem-se observar as respectivas seções críticas.

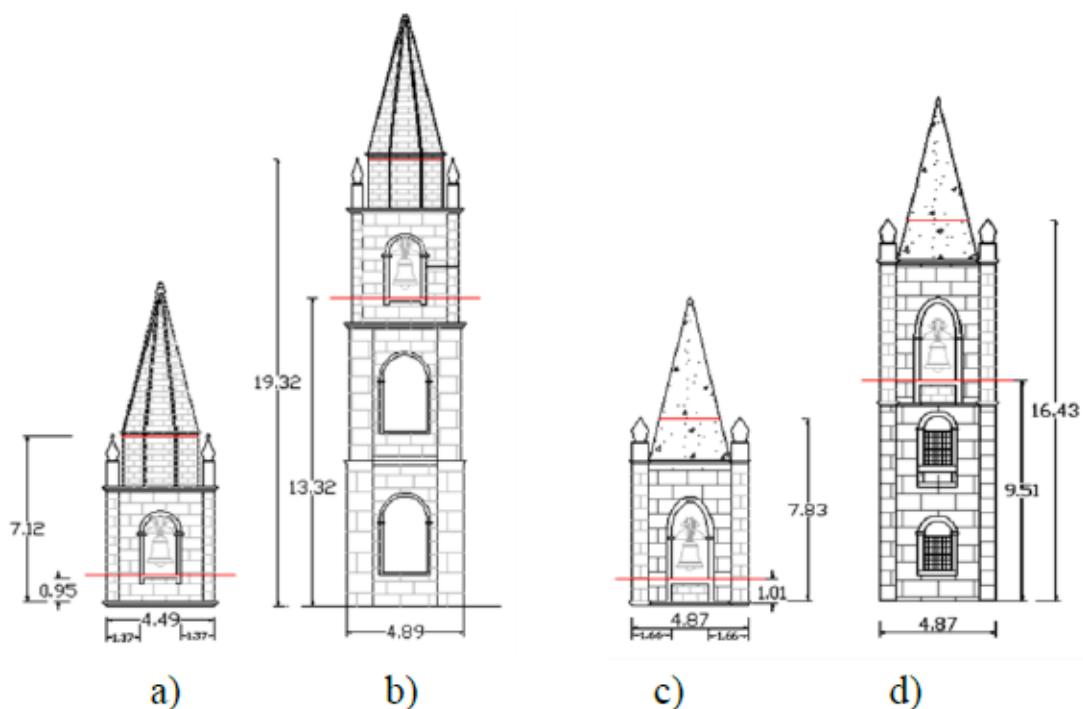


Figura 51 – Seções críticas para os dois casos: a) Igreja da Madalena considerando apenas o campanário; b) Igreja da Madalena considerando a torre isolada; c) Igreja das Bandeiras considerando apenas o campanário; d) Igreja das Bandeiras considerando a torre isolada [27].

O maior aumento de vulnerabilidade verificou-se na igreja de Bandeiras (torre mais baixa), justificado pelo número e dimensão das aberturas consideradas ao longo desta torre que lhe proporcionam uma maior vulnerabilidade sísmica.

7.3.5. Coro Alto (Mecanismo 29)

O macro-elemento designado de coro alto é de grande relevância, devido aos danos que resultam da sua interação com a restante estrutura, tais como, paredes laterais e arcarias que suportam esta estrutura ou mesmo interação com a fachada [29].

Este macro-elemento, é um elemento estrutural relevante nos danos ocorrentes de um sismo numa igreja. Este constitui um diafragma horizontal com uma determinada rigidez, dependente dos materiais que o constituem, integrando uma ação danificadora nas paredes laterais, esta estrutura, geralmente em madeira, encontra-se localizada na zona de entrada da igreja, constituindo um segundo piso que por vezes dá acesso às torres sineiras [27]. Na Figura 52 encontram-se ilustrados alguns danos provocados pelo respetivo coro perante um evento sísmico.



Figura 52 - Danos resultantes da interação entre coro alto e paredes laterais [27].

7.3.6. Outros Danos

Os danos mais frequentes, embora menos significativos correspondiam aos mecanismos de rotura das paredes por corte. Através da análise dos danos observados, estabeleceu-se um perfilamento dos padrões de repetição da localização e do tipo de fendas, os quais descrevem-se posteriormente, assim como ilustrados na Figura [11, 24]:

- a) Nas fachadas frontais das igrejas com torres foi observada maior concentração de fendas junto à união das torres com os frontispícios, Figura 53. Nas igrejas em salão, sem torres, as fendas encontravam-se mais dispersas;



Figura 53 - Fenda vertical na ligação entre as paredes e a nave, fendilhação diversa e queda de reboco [24].

- b) Nas igrejas de tripla nave foi observado maior desligamento entre o frontispício e as estruturas longitudinais (tetos, paredes intermédias e laterais), por vezes com queda de pedras dos muretes sobre as paredes de arcadas;

- c) Foi observado também o desligamento entre estruturas longitudinais e o tardo da nave, junto à inserção da capela-mor, por vezes com queda de pedras ou mesmo de panos das paredes laterais;
- d) Os danos nos frontões encontravam-se generalizados, incluindo a propagação de fendas horizontais pela base, Figura 54;



Figura 54 - Rotura do frontão da fachada [21].

- e) Danos em arcos devido a movimentos na direção transversal à nave, Figura 55;

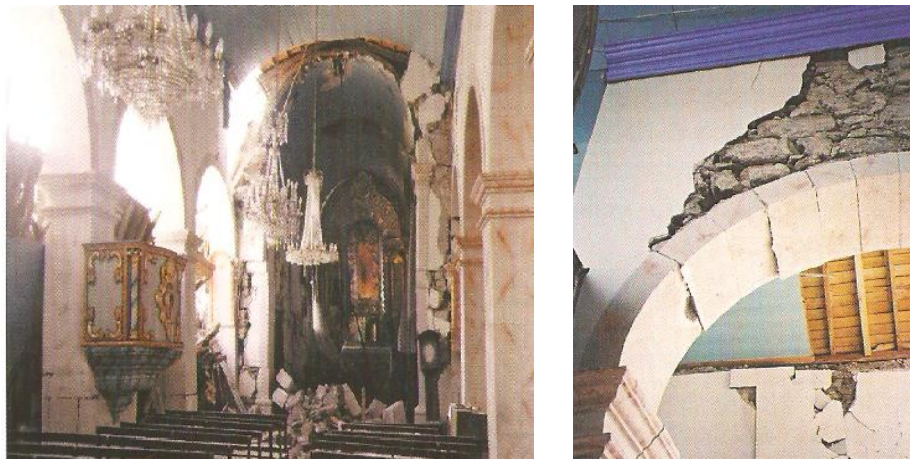


Figura 55 - Danos nos Arcos das Igrejas [21].

- f) Degradação das coberturas, Figura 56



Figura 56 - Degradação das coberturas [21].

- g) Também foi observada a queda de pináculos;
- h) Além destes danos, registaram ainda danos específicos de cada igreja que eram função da respetiva geometria e processo construtivo.

7.4. Conclusão

O património religioso é um tipo de estrutura muito afetada pelos sismos ocorridos no Arquipélago dos Açores ao longo dos anos, nomeadamente o de 9 de Julho de 1998, daí a extrema importância das intervenções de reabilitação e consequentemente do diagnóstico e registo do grau de dano após a ocorrência de um sismo, para a avaliação da vulnerabilidade sísmica associada ao mesmo, de modo a obter as intervenções de reforço adequadas, assim como reduzir significativamente os seus custos.

O desenvolvimento de estratégias de inspeção e registo de toda a informação constitui uma ferramenta essencial para compreensão do estado das igrejas após a ocorrência de um sismo, a sua possibilidade de utilização, assim como uma análise das prioridades e fragilidades de cada macro-elemento a ter em conta nas futuras intervenções a executar para o melhoramento do comportamento da estrutura, não esquecendo o principal objetivo que passa pela diminuição do risco sísmico.

Para a avaliação da vulnerabilidade sísmica relacionada com o sismo de 1998 baseou-se na metodologia apresentada pelo GNDT (*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terramoti*) que permite identificar 28 mecanismos de dano associados ao comportamento dos diferentes macro-elementos que constituem a igreja perante a ação sísmica.

A referida metodologia foi executada com o auxílio de uma ficha de levantamento de danos e avaliação da vulnerabilidade sísmica. Esta é dividida em três partes distintas, em que a primeira dedica-se ao conhecimento geral da estrutura, na segunda parte é feita a classificação dos diferentes mecanismos de dano observados, assim como a avaliação da vulnerabilidade da igreja associada a cada mecanismo, e por fim a terceira parte corresponde ao cálculo da avaliação da vulnerabilidade.

No entanto foram utilizadas outras metodologias com procedimentos mais simples, que passaram pela avaliação com registo fotográfico e por inspeção de igrejas, onde se concluiu que todas as igrejas possuíam coro alto, apresentado na sua maioria danos relacionados com o comportamento sísmico dos restantes macro-elementos, levando assim à introdução de um novo mecanismo de dano, o 29.

Após o levantamento de danos observados nas igrejas após o sismo, conclui-se que as zonas mais delicadas deste tipo de estruturas são: o mecanismo 2 (rotação do topo da fachada para fora do plano), mecanismo 3 (fissuração por ação de corte na fachada), mecanismo 7 (nave), mecanismo 19 (cobertura), mecanismo 27 (fissuração nas torres sineiras), mecanismo 28 (campanário) e o mecanismo 29 (danos no coro alto) são os mais frequentes.

Com o respetivo levantamento torna-se possível a organização de toda a informação relacionada com as fichas, permitindo assim a verificação de quais os danos que mais vezes se repetem e conseqüentemente auxiliar na escolha das intervenções mais apropriadas a cada elemento estrutural que merece especial cuidado.

Ao observar-se o resultado obtido na avaliação da vulnerabilidade das respetivas igrejas constatou-se que o valor do índice de dano é relativamente baixo na grande maioria das igrejas, em que em apenas dois casos este é igual ou superior a 0,3, o que significa que estas igrejas não reúnem as condições de segurança para serem utilizadas. Pois as igrejas ficam sem condições de utilização quando o valor do índice de dano ultrapassa o valor limite, 0,3.

Em relação ao índice de vulnerabilidade verifica-se que este na generalidade apresenta um valor elevado, ou seja, entre 0,5 e 0,7, visto que o seu limite é 1.

Por fim, o índice de segurança na grande maioria dos casos apresenta valores inferiores à unidade, tal acontecimento significa que as igrejas em análise não estariam em condições de suportar um sismo com a aceleração de referência ponderada, sendo a aceleração de referência correspondente à região em causa, assim como os resultados obtidos dependentes dos valores admitidos para o fator amplificativo do solo e o fator de importância.

Técnicas de Reforço Empregadas em duas Igrejas e Respetivo Índice de Vulnerabilidade

8.1 Considerações Gerais

A inevitabilidade da ocorrência de sismos neste Arquipélago implica uma preocupação acrescida na utilização de técnicas de reforço que assegurem as exigências de segurança sísmoresistente, como forma de acautelar a salvaguarda de pessoas e bens e a preservação da memória do Património para as gerações futuras. Contudo, estas ações de reforço têm que resultar do compromisso entre as exigências de segurança e não descaracterização do conceito original da construção.

Os abalos sísmicos são responsáveis pelas diversas alterações que surgem com o passar dos anos em construções antigas. Em relação ao Património Religioso este deve ser mantido da melhor forma possível, pois este é uma marca da memória da personalidade açoriana, que deve ser sempre lembrada. No entanto a necessidade de reabilitar o respetivo património afetado pelos sismos, faz sempre com que este acabe por sofrer incoerências, evitando que seja mantido na sua totalidade. Desta forma, o estudo das técnicas de reabilitação utilizadas torna-se fundamental para perceber a evolução da reabilitação na construção.

A vulnerabilidade sísmica de uma determinada estrutura e uma correta avaliação dos danos consequentes da ocorrência de um sismo tem um papel fundamental no reforço sísmico das respetivas estruturas. Desta forma, consegue-se melhorar claramente o seu comportamento à ação sísmica, assim como reduzir de uma forma significativa os custos de reabilitação dos edifícios em causa. Tal como já foi mencionado anteriormente, ao longo dos anos o arquipélago dos Açores foi assolado com variados eventos sísmicos, sendo a evolução dos

meios tecnológicos e das técnicas de reforço um aspeto crucial no desenvolvimento das igrejas, através do conhecimento adquirido pelos variados estudos efetuados nos diversos sismos ocorridos.

As ações de reabilitação e reforço das estruturas comparativamente com as construções novas apresentam algumas desvantagens, principalmente devido à necessidade de uma análise profunda aos materiais adequados a aplicar a cada tipo de solução, assim como os cuidados que um trabalho desta importância requer para que seja de qualidade. É também importante salientar a associação dos novos materiais com os materiais já existentes nas estruturas, pois é um aspeto fundamental para que o reforço aplicado seja de qualidade, daí ser de extrema importância o conhecimento das características dos materiais.

Posteriormente descrevem-se duas igrejas danificadas pelo sismo de 1998, as soluções de reforço efetuadas após o sismo, assim como o cálculo do índice de vulnerabilidade após o referido reforço, de forma a verificar o seu comportamento perante a ocorrência de um abalo sísmico.

8.2. Descrição da Igreja da Madalena e Bandeiras

A quantidade de igrejas contruídas pode-se considerar muito elevada, sendo as mesmas construídas sob a justificação da aproximação de Deus. Para o povo açoriano a presença de um templo, junto das populações, como local de refúgio e acolhimento era muito importante, devido às catástrofes que se sucedem. Pois para este povo tudo quanto de mal rodeasse o ser humano, incluindo catástrofes naturais, seria, simplesmente fruto da justiça implacável de Deus [32].

8.2.1. Igreja da Madalena

A construção da igreja da Madalena iniciou-se em meados do século XVII, tendo terminado em 1891 com a conclusão da sua fachada. Toda a sua descrição foi efetuada com base no projeto de execução da solução a adotar da referida igreja [31]. Na Figura 57 encontra-se a vista geral da mesma.



Figura 57 - Vista geral da igreja da Madalena [31].

A igreja da Madalena possui um corpo principal constituído por três naves, com uma dimensão global de $14.5 \times 29.43\text{m}^2$, tendo a nave central 6.32m de vão, as duas laterais 3.41m , sendo que na dimensão longitudinal não se considerou a zona do hall de entrada que tem 4.50m de comprimento. Existe também uma cabeceira com um comprimento até ao altar de 9.60m e uma largura de 5.60m , esta é a zona mais baixa e mais estreita em quase todas as igrejas, lateralmente à referida cabeceira existem ainda duas sacristias, uma de cada lado. Tal como se pode observar na Figura 58.

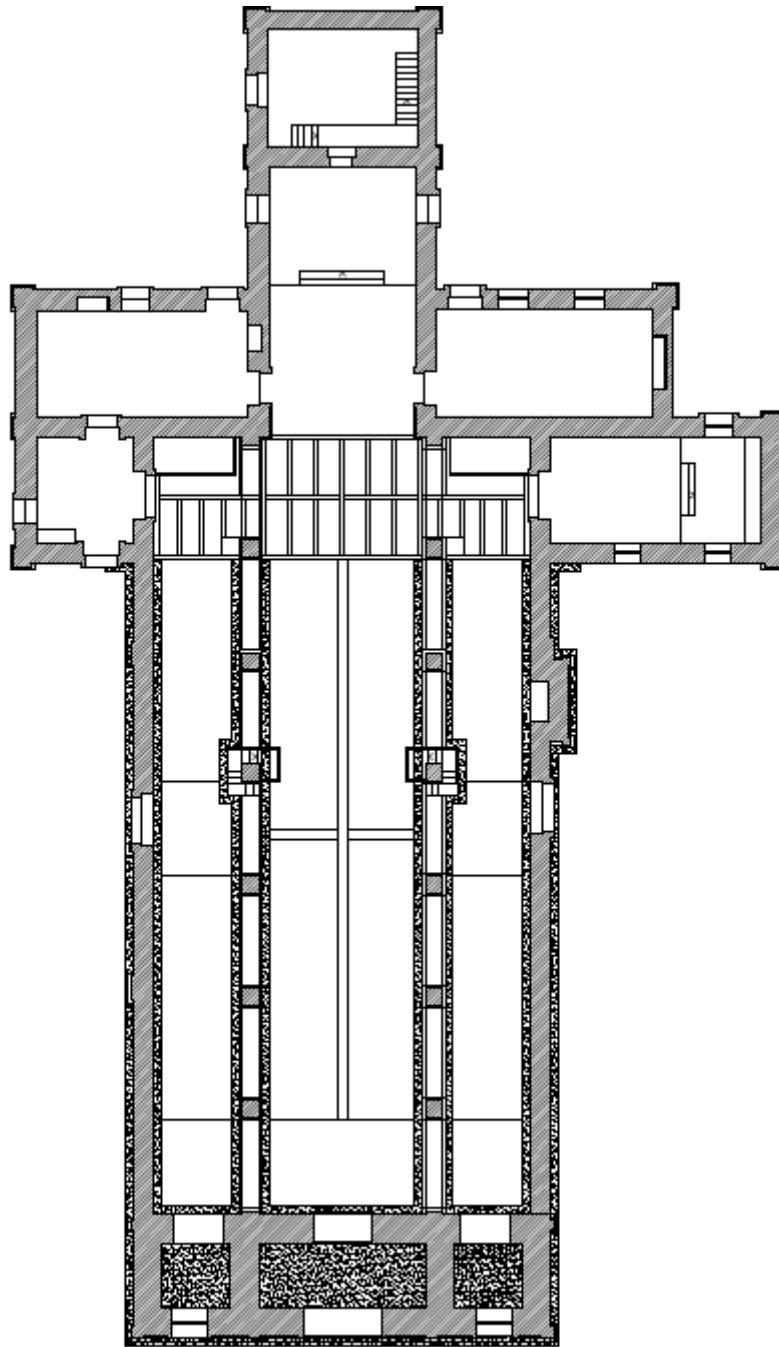


Figura 58 - Planta da Igreja da Madalena.

As naves laterais têm como apoio a parede exterior e os arcos que apoiam nos pilares centrais, com uma dimensão de 0.66 x 0.66m, espaçados de 3.64m. Os respectivos arcos dão apoio à nave central que apresenta uma altura de 10.97m. Na Figura 59 pode-se observar os arcos que dão apoio às naves laterais e central.



Figura 59 – Arcos de apoio às naves laterais e central [31].

No interior da igreja existe ainda um coro alto, situado por cima do hall de entrada, interligado com duas salas dispostas em cada um dos lados (Sul e Norte) do eixo da Igreja, Figura 60.



Figura 60 - Coro alto por cima do hall de entrada [31].

A fachada principal da igreja é simétrica, no entanto em planta já não o é, devido às sacristias que embora sejam semelhantes apresentam dimensões diferentes. A referida fachada encontra-se sensivelmente virada a Nascente e revestida de azulejo branco.

Em relação às torres, estas encontram-se enquadradas na nave da igreja com uma altura total de 17.20m, com exclusão da cobertura em forma octogonal, e possuem uma dimensão exterior em planta de 4.59 x 4.50m².

Por último, as paredes exteriores são paredes de alvenaria de duas folhas, com 0.90m de

espessura e com pedra irregular, sendo as mesmas elementos estruturais fundamentais, pois recebem no nível superior a cobertura, de duas águas, executada com telha de aba e canudo, apoiada num forro que por sua vez apoia numa estrutura de madeira, descarregando nessa parede e nas interiores, tal como se encontra ilustrado na Figura 61. Cada nave apresenta o teto inferior abobadado, sendo constituído por placas curvas de estafe e fasquiado suspensas no vigeamento da cobertura.



Figura 61 - Apoios intermédios da estrutura da cobertura [31].

8.2.2. Igreja das Bandeiras

À semelhança da igreja da Madalena, a descrição da igreja das Bandeiras foi também efetuada com base no projeto de execução da solução a adotar na referida igreja [32]. Esta apareceu na história em 1860, designando-se como Igreja de Nossa Senhora da Boa Nova, Figura 62.



Figura 62 - Vista geral da igreja das Bandeiras [32].

Tal como a igreja da Madalena, a igreja das Bandeiras apresenta uma forma quase simétrica, Figura 63, demonstrando algumas diferenças apenas nas sacristias laterais à cabeceira. O seu corpo principal é composto por três naves, tendo a central 5.46m e as duas laterais 3.39m de vão e uma cabeceira com um comprimento até ao altar de 8.63m e uma largura de 5,64m, sendo também a zona mais baixa e estreita da igreja. Em relação às dimensões globais das 3 naves, estas são 13.60 x 26.70m².

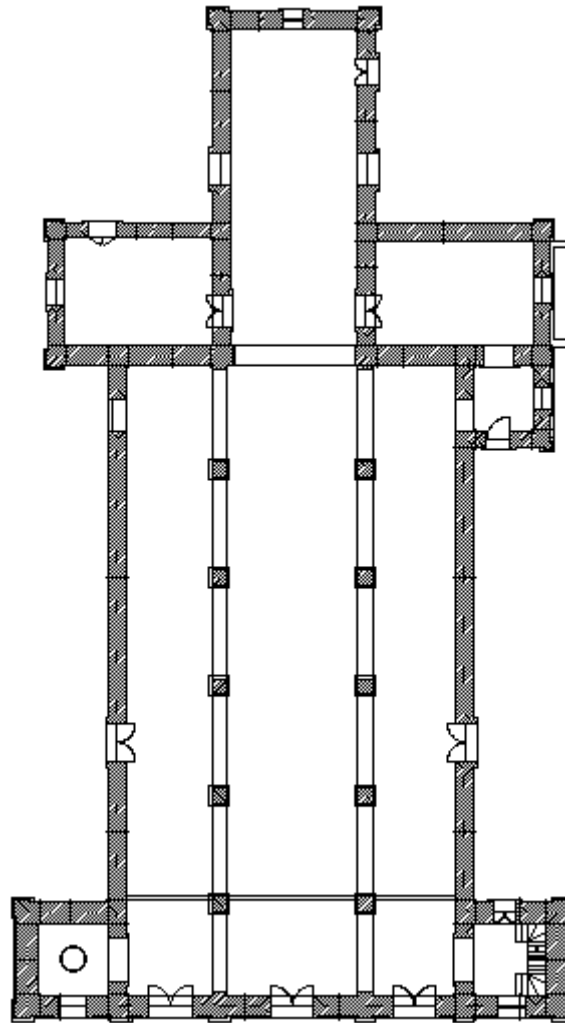


Figura 63 - Planta da Igreja das Bandeiras [32].

Cada nave lateral apoia na parede exterior e em arcos que apoiam em pilares centrais, com 0.65 x 0.65m, espaçados de 3.93m, sendo a sua altura no ponto médio de 9.03m. os referidos arcos servem de apoio à nave central que apresenta uma altura de 10.39m, Figura 64.



Figura 64 - Arcos de apoio às naves laterais e centrais [32].

Em relação ao coro alto, este encontra-se apoiado em dois arcos e nas paredes exteriores, situado na entrada da igreja. A torre, tem as dimensões exteriores de $5.10 \times 4.28\text{m}^2$ em planta e uma altura total de cerca de 17.0m.

As suas paredes exteriores são também de 0.90m de espessura de duas folhas, executada com pedra aparelhada, sendo as mesmas os elementos estruturais fundamentais. As respetivas paredes recebem no nível superior a cobertura, de duas águas, com telha de aba e canudo apoiada num forro apoiado numa estrutura de madeira que descarrega na mesma parede e nas interiores, tal como se encontra ilustrado na Figura 65.



Figura 65 - Cobertura vista do interior [32].

Na Figura 63 pode-se ainda observar que a parede encontra-se rebocada de uma forma irregular e os apoios dos barrotes encontram-se ao contrário do que é habitual, nas coberturas típicas das ilhas, devendo existir uma ligação na zona do altar.

8.3. Soluções de reforço efetuadas

A decisão e a escolha de soluções de reabilitação e reforço devem ser o resultado de uma análise global e de investigação. Em primeiro lugar avaliar a segurança presente e depois os níveis esperados ou que podem ser alcançados como resultado da ação. Para tal devem ser efetuados cálculos numéricos com recurso a modelos de comportamento não lineares, que nos permita elucidar aspetos mais particulares, que a experiência de outras situações não permite detetar.

Neste tipo de intervenções deve haver sempre um compromisso entre não interferir com o conceito original do edifício e a necessidade de assegurar exigências de segurança, assim, o trabalho deve ser levado a cabo tentando-se usar as técnicas específicas e tecnologias que eram originalmente usadas na construção. Estas medidas têm que assegurar continuidade adequada e conexões entre todos os elementos estruturais principais de paredes, pisos e telhados. Isto consegue-se melhorando o comportamento estrutural.

As soluções de reforço empregadas nas igrejas afetadas pelo sismo de 1998 foram todas muito semelhantes, pois o seu método construtivo, assim como os materiais empregados nas mesmas eram muito idênticos, daí a semelhança nos danos ocorridos pelo abalo sísmico e consequentemente o seu reforço.

Um aspeto crucial neste tipo de construção passa pelas boas ligações entre os elementos estruturais principais da construção para que a mesma não exiba grande vulnerabilidade à ação dos sismos, pois só assim se consegue garantir que os referidos elementos funcionem em conjunto quando atuados pelo movimento sísmico. Para tal, o tipo de intervenção para a concretização dessas medidas consiste em assegurar a continuidade dos diversos elementos estruturais, tais como as paredes, pisos e coberturas, assim como certificar as conexões entre todos estes elementos.

Posteriormente encontram-se descritas as soluções de reforço efetuadas, particularmente, nas igrejas da Madalena e Bandeiras.

8.3.1. Reforço das Fundações

O reforço das fundações foi efetuado tendo em conta a sua capacidade resistente, assim como fornecer uma estrutura que permitisse evitar desagregações durante a ocorrência de sismos, que possibilitasse a amarração de reboco armado à fundação e a ligação dos diversos elementos resistentes a este nível através de lintéis de betão armado [21].

Para tal efetuou-se um alargamento moderado da fundação com dois septos de betão armado, nos quais encontram-se amarrados varões de ligação à malha de reboco armado das paredes, assim como os lintéis [3].

Posteriormente na Figura 66 e 67 pode-se observar também um esquema de reforço em corte do reforço das fundações das paredes exteriores e interiores respetivamente. Tendo sido adotada uma técnica idêntica de ligação das fundações, tanto exteriores como interiores, com recurso a septos contínuos, um de cada lado no alinhamento dos pilares, em que as interiores conferem à estrutura um bom funcionamento de conjunto de todos os elementos estruturais principais pela sua ligação através de lintéis entre alinhamentos e às paredes laterais.

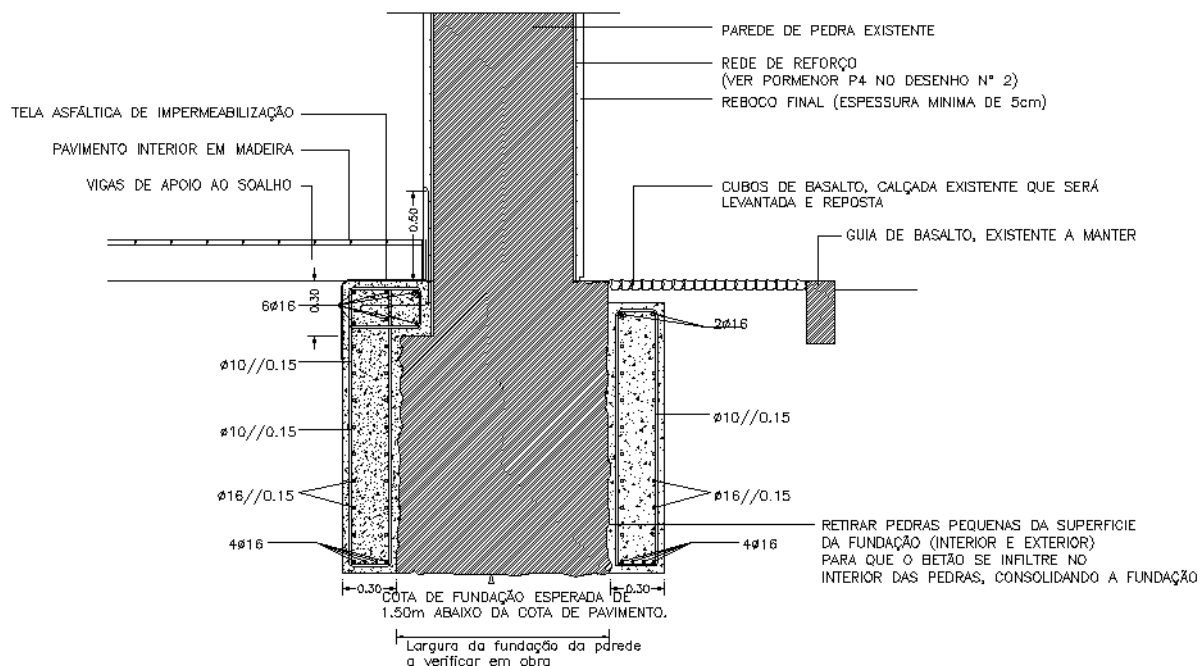


Figura 66 - Pormenor de reforço das fundações das paredes exteriores por uma fundação contínua [31].

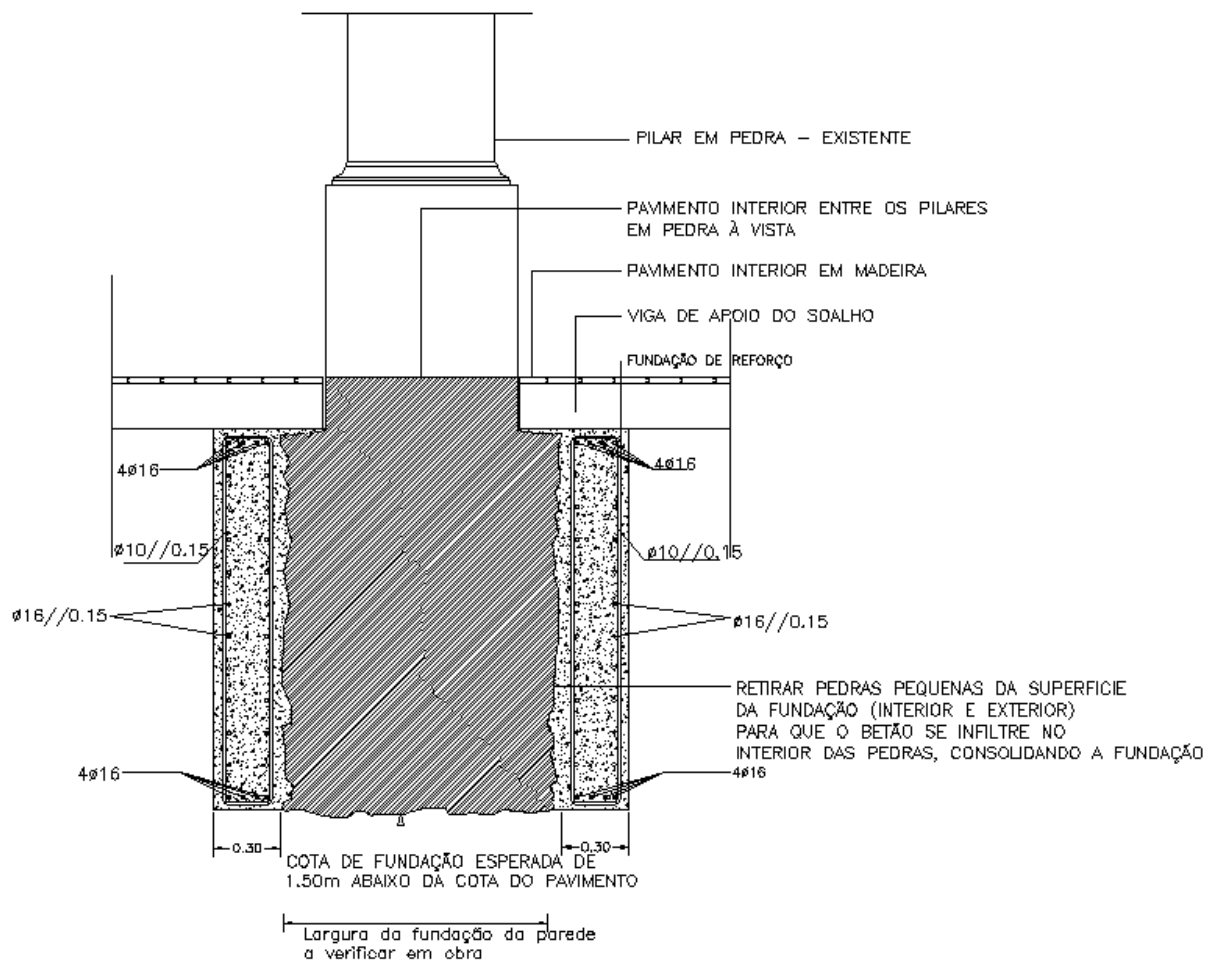


Figura 67 – Pormenor de reforço de ligação dos pilares interiores por uma fundação contínua [31].

Na Figura 68 encontra-se também ilustrado um corte com a localização do reforço das fundações referente à igreja da Madalena.

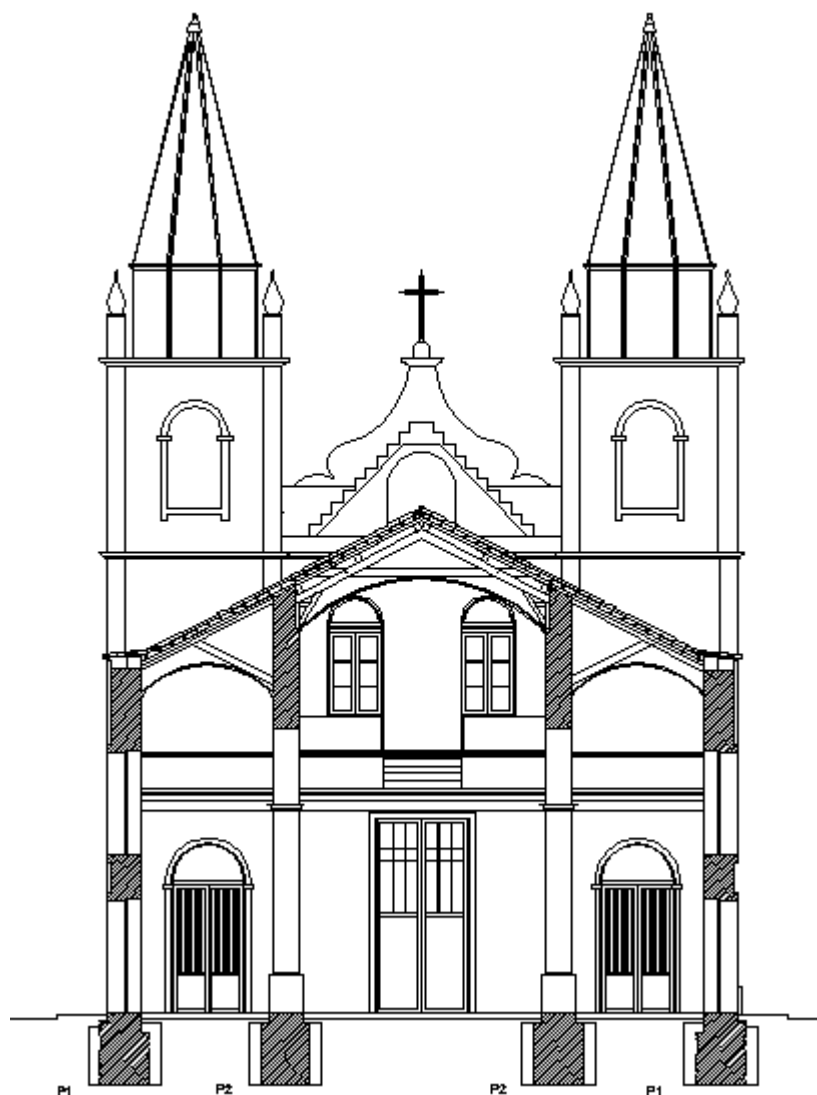


Figura 68 - Localização do reforço das fundações, igreja da Madalena [31].

8.3.2. Reforço das Paredes

A reparação das alvenarias de pedra abrange vários procedimentos, tais como: o reposicionamento de pedras deslocadas, o desmonte e reconstrução de algumas zonas dos panos de parede mais afetados, o avivamento e refechamento de juntas e fissuras [21], assim como o reforço com recurso a outro tipo de materiais que conferem à estrutura uma maior resistência e durabilidade.

O reforço das paredes foi efetuado de várias formas, consoante a sua localização, tais como: entre três panos de parede, na zona das cantarias e nas paredes exteriores. O respetivo reforço executou-se com recurso a estrutura metálica através de ligadores, redes e cantoneiras em aço

inox, assim como aplicação de reboco e injeção de calda de base cimentícia não retráctil. De seguida apresentam-se os pormenores dos três tipos de reforço executados nas paredes, assim como a sua descrição.

i. Reforço entre três panos de parede

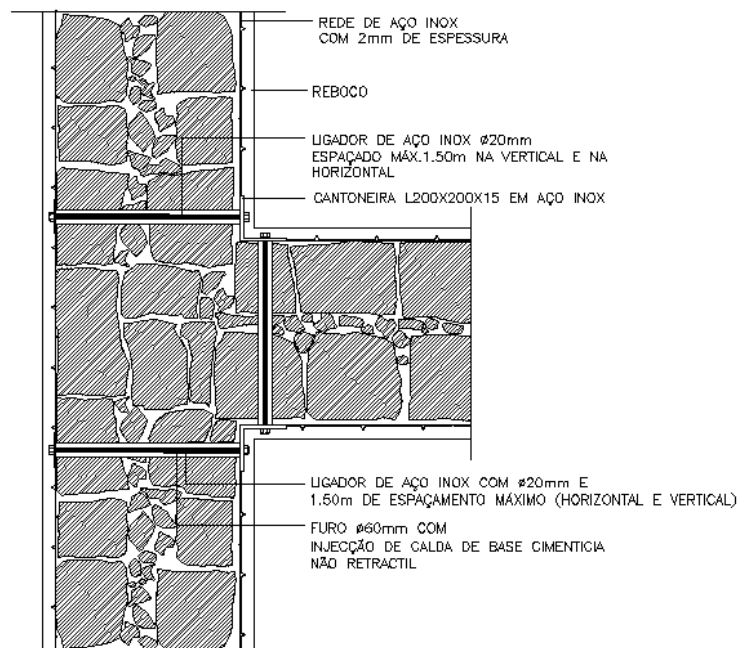


Figura 69 - Corte horizontal do pormenor de reforço das paredes com estrutura metálica, quando se encontram três panos de parede [31].

Na Figura 69 pode-se observar a execução de reboco armado com recurso a uma rede de aço inox em ambas as faces da parede, tendo sido o mesmo efetuado desde a sua fundação, ligadas por conectores metálicos. É importante salientar que nas zonas de execução de emendas, deve-se garantir um mínimo de 15cm de sobreposição, tal como se encontra ilustrado na Figura 70.

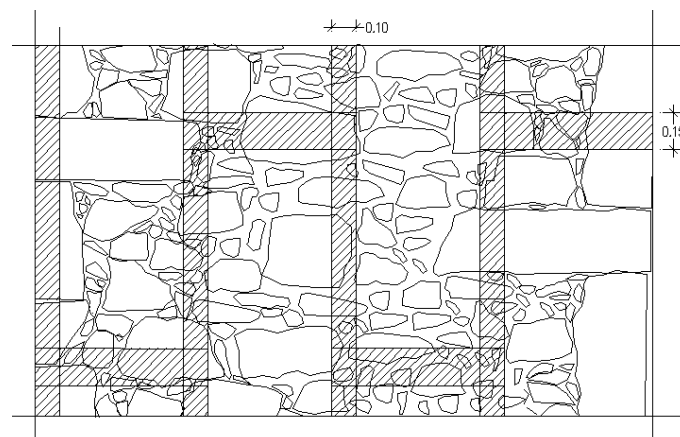


Figura 70 - Esquema de sobreposição da rede em aço inox [31].

Na Tabela 8 pode-se ainda observar as características mecânicas da rede em aço inox utilizada no referido reforço das paredes de alvenaria.

Tabela 8 - Características Mecânicas - Aço Inox [31].

Designação	Rm (N/mm²)	Rp 0,2 (N/mm²)	Alargamento (%)	Dureza (HB)
Requisitos Aço Inox	515,0	205,0	40	202,0

O respetivo reforço implica também a limpeza das juntas e o seu refechamento, tendo sido esta técnica utilizada em todas as paredes estruturais rebocadas, iniciando-se com a remoção do reboco original e limpeza a jato de água seguida de aplicação na nova camada de reboco com armadura [21], conforme ilustrado na Figura 71, o respetivo reboco deve garantir o recobrimento da malha de aço e deve ter pelo menos 3cm de espessura [3].

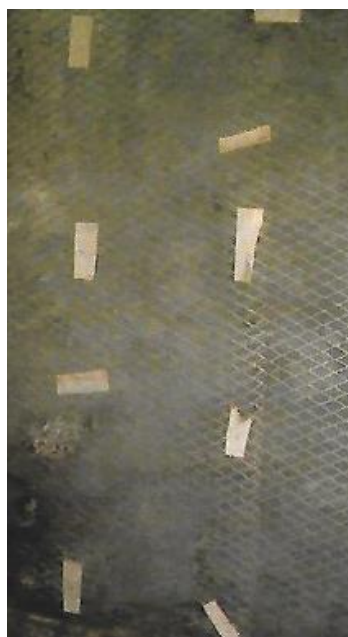


Figura 71 - Rede de Aço Inox de reforço ao reboco [21].

Nas zonas de ligação dos três panos constata-se a existência de uma cantoneira em aço inox, que garante a ligação entre os pisos às paredes, tornando mais rígidos os pisos de madeira no seu plano, assim como a colocação de um ligador em aço inox (Figura 72, 73 e 74) verticalmente e horizontalmente de forma a permitir uma ligação eficiente entre as paredes cujas pedras não apresentem um cruzamento adequado para um bom travamento [21].



Figura 72 - Furação de alvenarias para colocação do ligador [21].

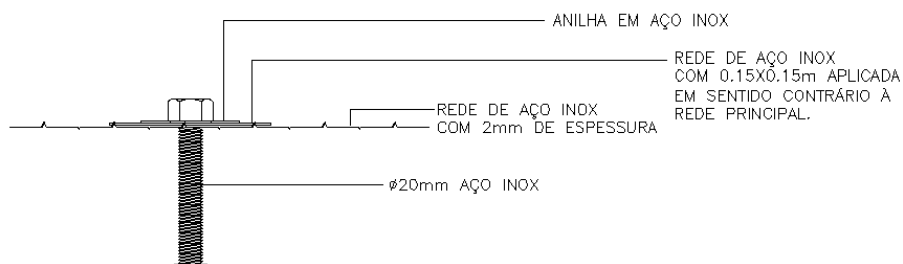


Figura 73 – Corte vertical do ligador em aço inox [32].

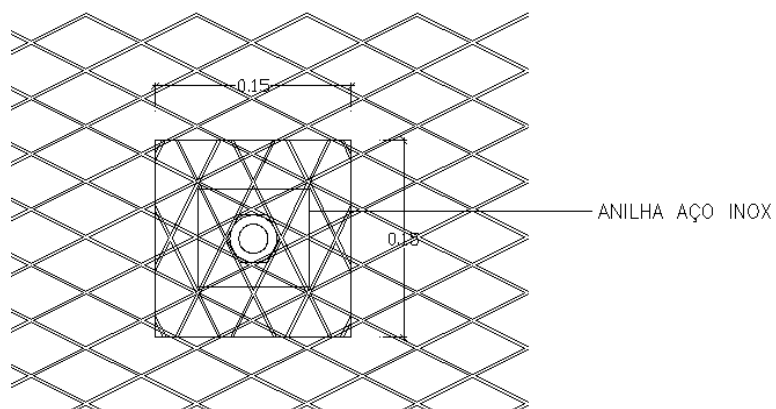


Figura 74 - Corte horizontal do pormenor do ligador em aço inox [32].

Por último, verifica-se também a presença de um furo onde se injetou uma calda de base cimentícia não retráctil para preenchimento dos vazios internos, assim como para homogeneizar o material do interior da parede. Esta é uma técnica de difícil quantificação, pois existe uma grande dificuldade em verificar os vazios existentes [3].

ii. Reforço na zona das cantarias

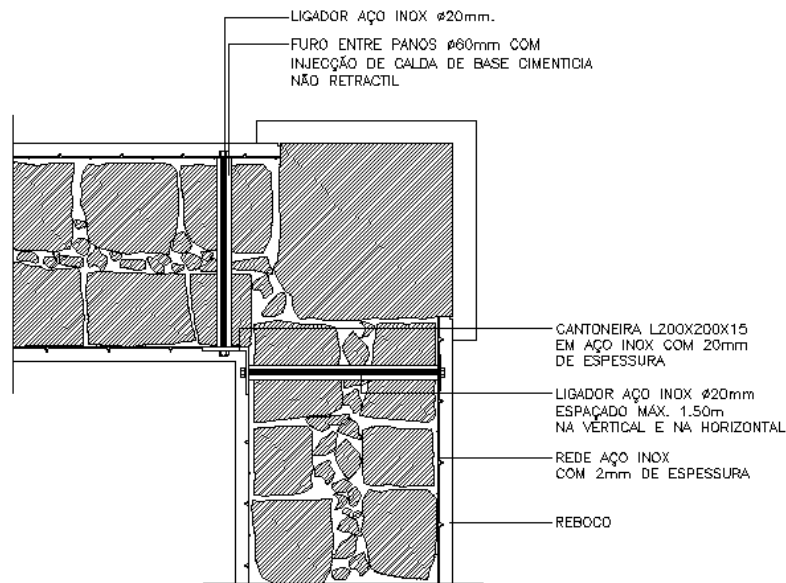


Figura 75 - Corte horizontal do pormenor de reforço das paredes com estrutura metálica, na zona das cantarias [32].

O processo de execução do reforço na zona das cantarias é muito idêntico ao reforço entre três painos de parede, descrito anteriormente, sendo neste caso feita a união somente em duas paredes formando um “canto”, como se observa na Figura 75.

O referido reforço distingue-se por ter zonas de pedra à vista, requerendo assim de cuidados especiais nas mesmas, tais como: ombreiras, prumadas verticais e horizontais e arcos, onde não se procede à colocação de reboco armado. Para tal, torna-se inevitável a interrupção do reboco nessas zonas, daí proceder-se à colocação de elementos metálicos que “cozam” os cantos ou cruzem as paredes em sentido oblíquo com o intuito de garantir a ligação das malhas [21]. Na Figura 76 podem-se observar algumas situações em que se encontra implementada a estratégia referida.



Figura 76 - Pedras à vista nos arcos [21].

iii. Reforço na zona da parede exterior

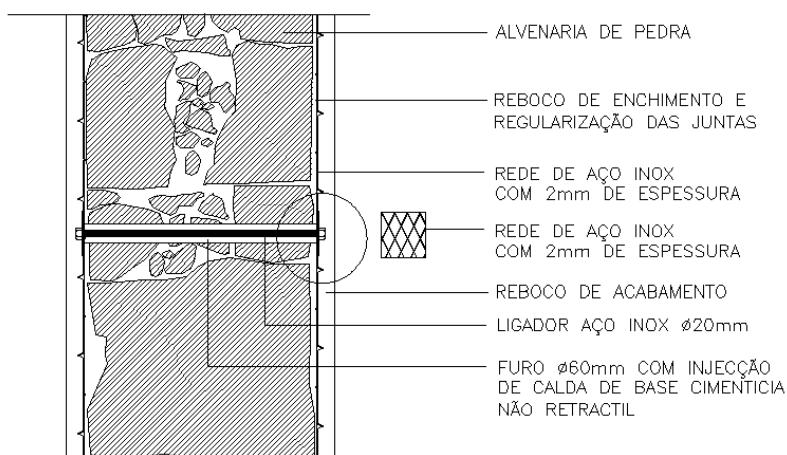


Figura 77 - Corte vertical do pormenor de reforço das paredes com estrutura metálica, na zona da parede exterior [31].

Em relação ao reforço na zona da parede exterior, pode-se constatar pela análise do pormenor ilustrado na Figura 77 que a técnica utilizada foi em tudo idêntica ao reforço utilizado no reforço entre três panos de parede, assim como na zona das cantarias, tendo sido todo o procedimento apresentado e descrito anteriormente.

No entanto, importa salientar a parte final do reforço das paredes, sendo esta o coroamento das mesmas através do remate com a execução de cintas de coroamento nos dois sentidos, incluindo as paredes de arcaria, ligando e travando toda a estrutura nos níveis superiores incluindo a montagem de ferros de diâmetro 16 afastados de 0.15m a ligar as vigas à rede de reforço das paredes [21]. Na Figura 78 encontra-se ilustrado um exemplo do referido reforço.

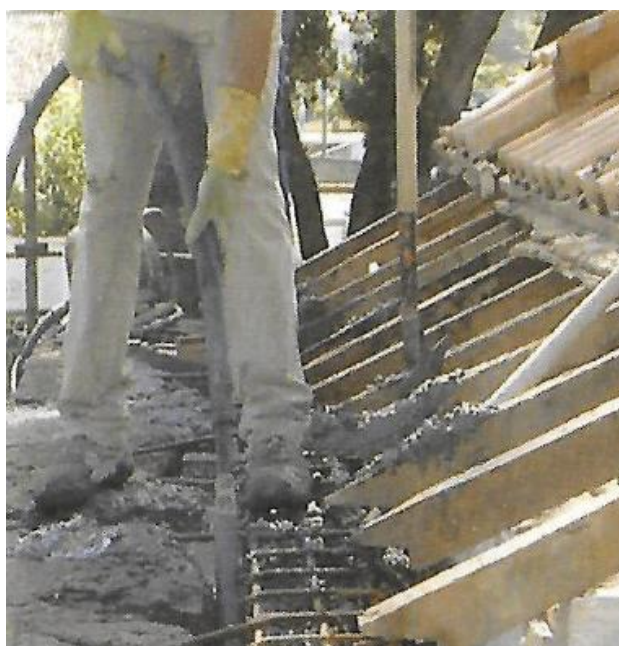


Figura 78 - Reforço das paredes com coroamento [21].

8.3.3. Reforço de Arcos e Coberturas

Os arcos e as coberturas na sua ligação aos pisos desempenham um papel fundamental na estabilidade conjunta da estrutura perante a ocorrência de um abalo sísmico. O reforço destes elementos é de extrema importância, por serem estruturas de contraventamento que garantem uma boa transmissão de esforços à fundação, pois as paredes laterais apoiam-se nos pisos e na cobertura para resistir a forças horizontais [21].

Posteriormente passa-se a descrever os vários reforços executados relacionados com os arcos e coberturas das igrejas.

i. Travamento dos arcos e paredes

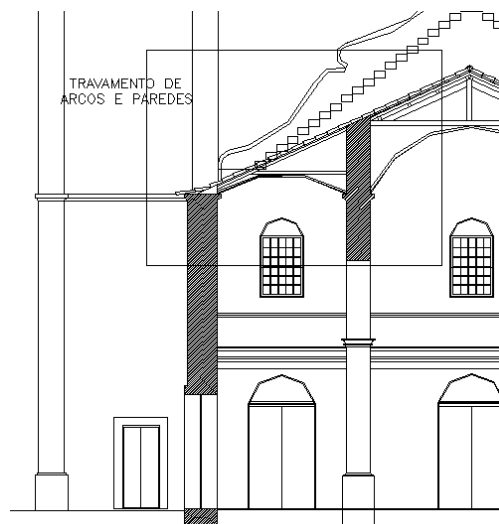


Figura 79 - Identificação do reforço dos arcos e paredes [32].

Nas igrejas em análise efetuou-se o reforço na cobertura e nas ligações da mesma às paredes onde se apoia, de forma a conseguir-se uma adequada rigidez com o intuito de restringir os movimentos das paredes. O referido reforço, Figura 80, foi efetuado na ligação das paredes à cobertura, assim como nas fachadas em que esta se apoia e nas empenas às quais ela é paralela.

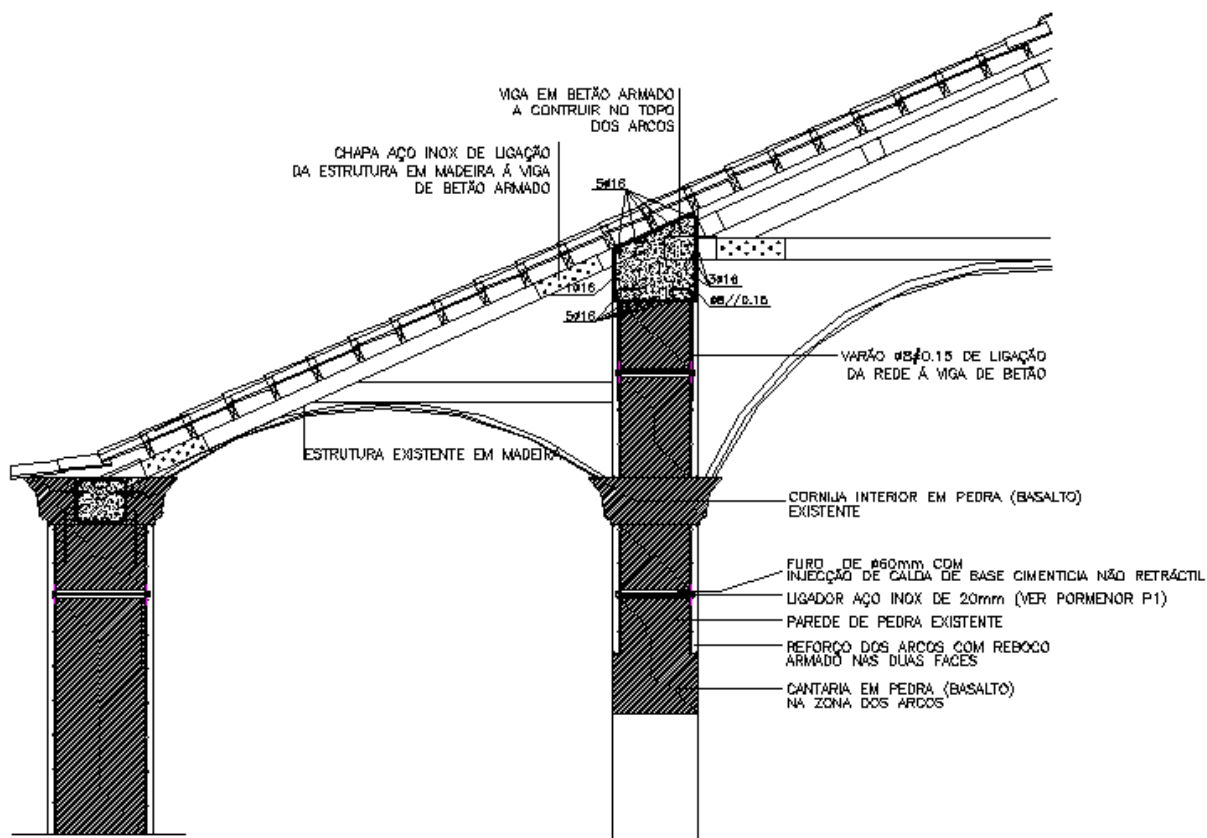


Figura 80 - Esquema de travamento dos arcos e paredes [32].

No esquema apresentado constata-se que o travamento dos arcos interiores e das paredes exteriores, efetuou-se utilizando a própria estrutura existente em madeira que será ligada às vigas em betão armado, que se irão construir no topo das paredes, através de um reforço em peça metálica, Figura 81, que ligada aos dois elementos referidos (estrutura em madeira, viga de betão), permite assim o travamento e a ligação dos vários elementos estruturais que constituem a igreja. Deve ainda ser assegurada a continuidade, em planta das vigas em betão armado, devendo a armadura ser emendada com os comprimentos de amarração regulamentares [32].



Figura 81 - Reforço metálico do travamento dos arcos interiores e paredes exteriores [21].

ii. Reforço das coberturas no topo das paredes exteriores perpendiculares aos barrotes da cobertura

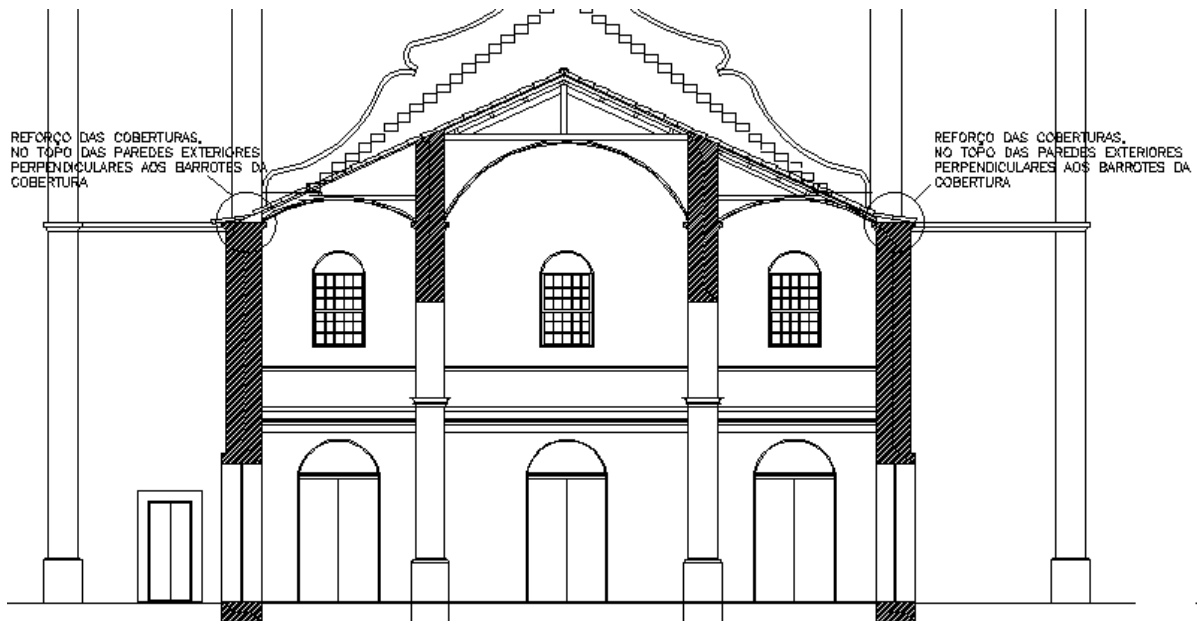


Figura 82 - Identificação dos reforços das coberturas [32].

O reforço das coberturas, no topo das paredes exteriores perpendiculares aos barrotes da cobertura foi efetuado à semelhança do travamento dos arcos e paredes com uma peça metálica de ligação ao barrote de madeira existente, Figura 83.

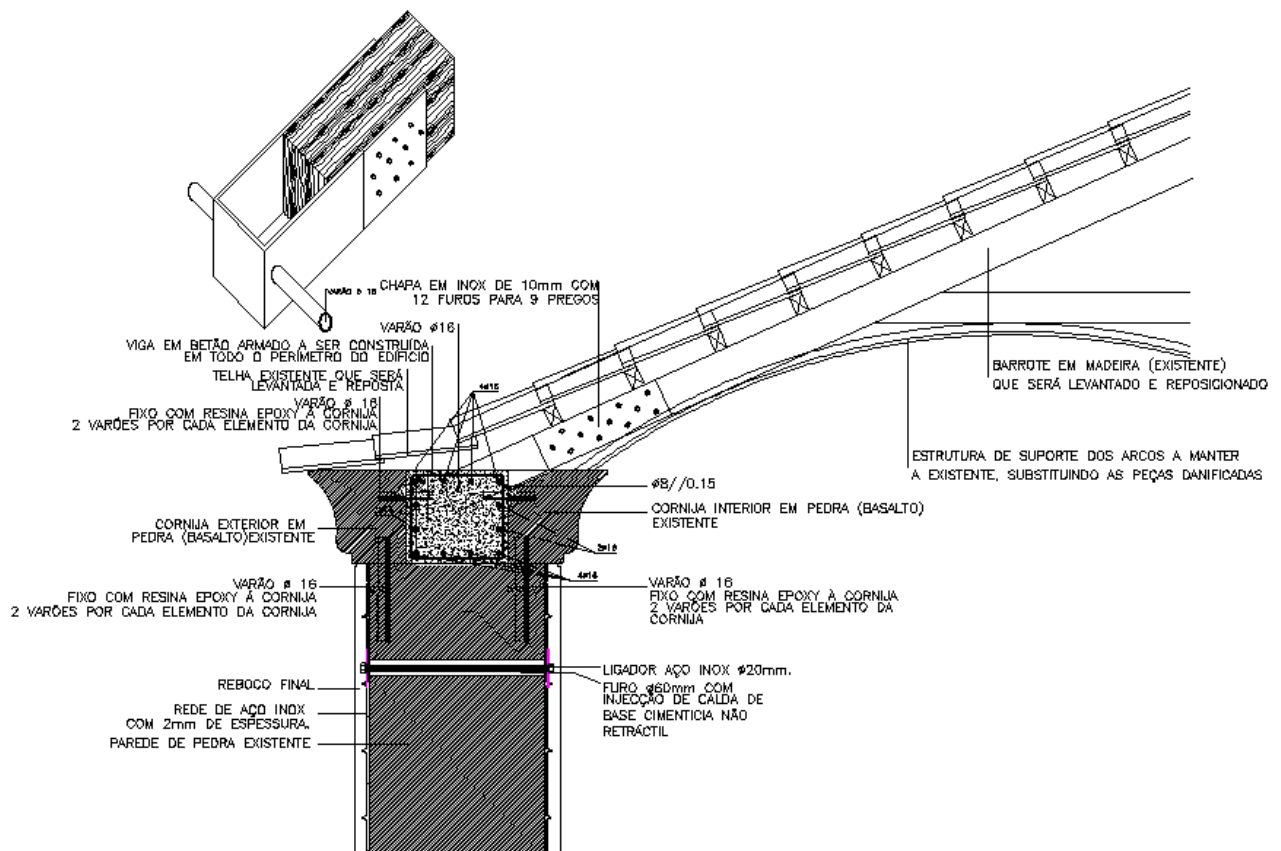


Figura 83 - Reforço das coberturas no topo das paredes exteriores [32].

O presente caso diferenciou-se pelo reforço da cornija, em que esta foi dividida em duas pedras de cornija interior e exterior, permitindo a introdução da viga cinta e a amarração da peça metálica de reforço e ligação das asnas, tal como se encontra ilustrado na Figura 84.

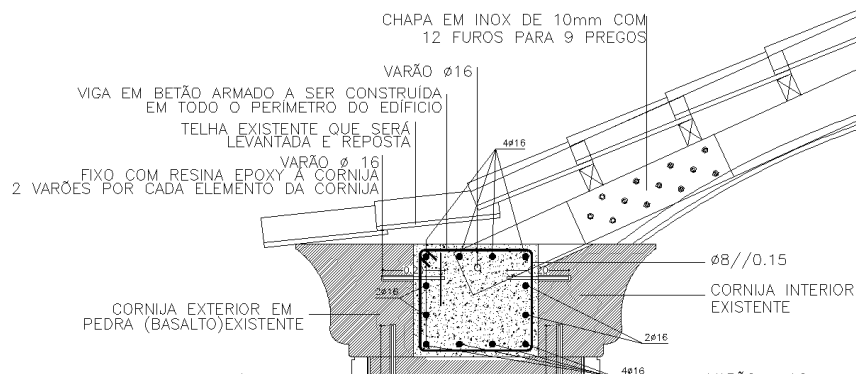


Figura 84 - Pormenor de reforço da cornija [32].

iii. Reforço das coberturas, no topo das paredes exteriores paralelas aos barrotes da cobertura

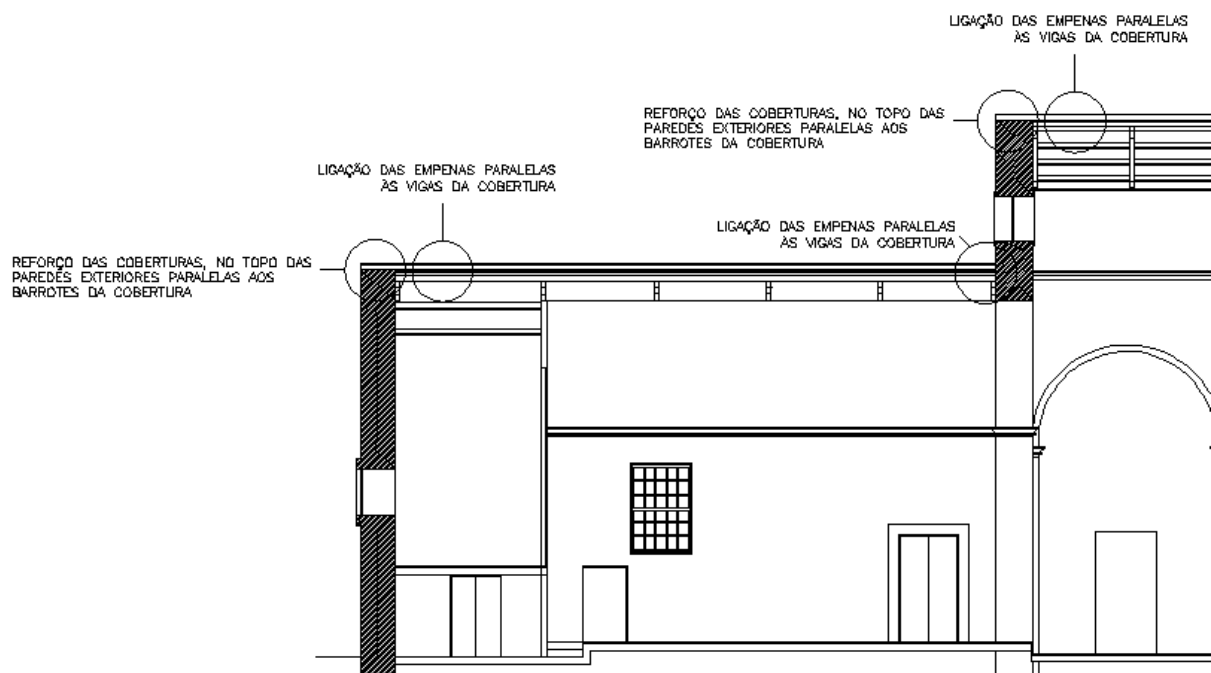


Figura 85 - Identificação dos reforços das coberturas [32].

O reforço das coberturas, no topo das paredes exteriores, neste caso paralelas aos barrotes da cobertura, foi efetuado de forma idêntica à técnica de reforço mencionada anteriormente no ponto ii, diferenciando-se apenas na divisão da pedra da cornija, pois neste caso a viga cinta localiza-se diretamente no interior da parede.

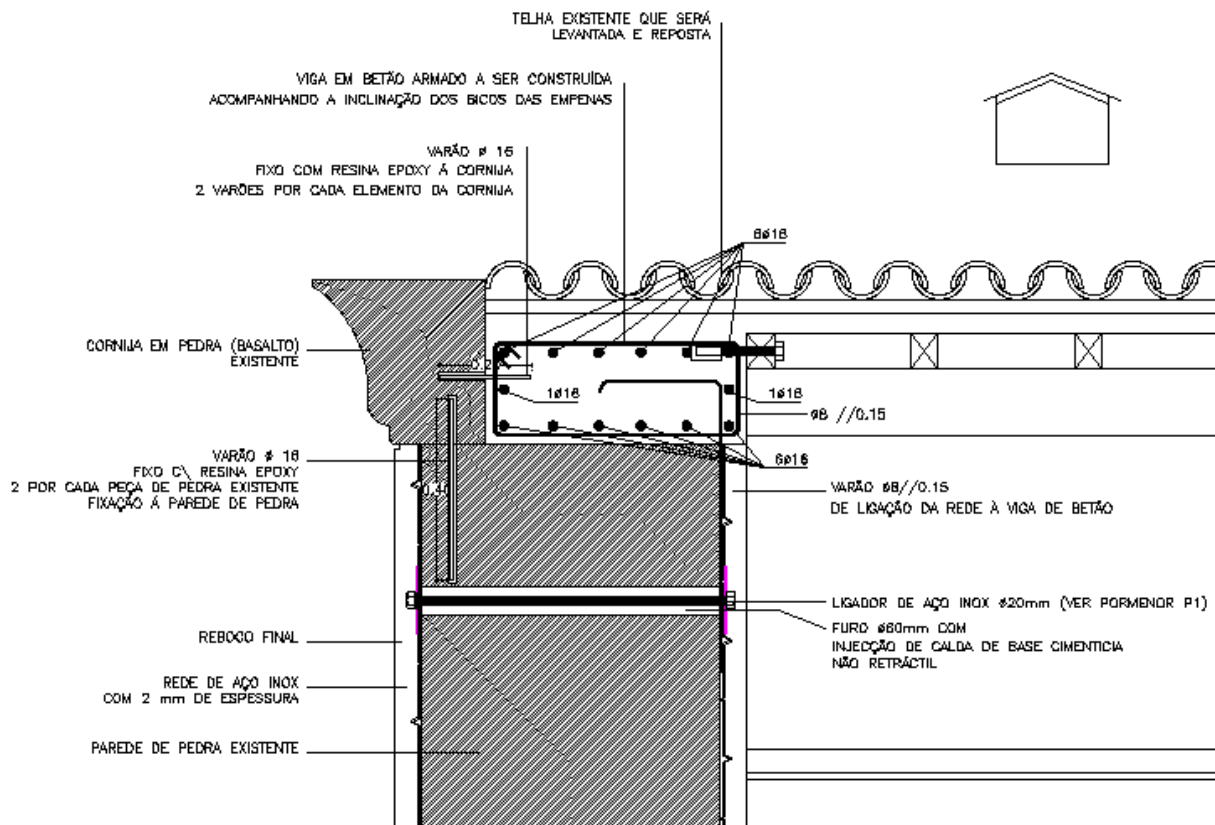


Figura 86 - Pormenor de reforço da cobertura no topo das paredes exteriores [32].

iv. Ligação das empenas paralelas às vigas da cobertura

A ligação empenas às vigas da cobertura foi efetuada através de uma bucha química ligando a viga existente à viga de criptoméria a adicionar à empena através de uma chapa quinada em aço inox, tal como se encontra ilustrado nas Figuras seguintes.

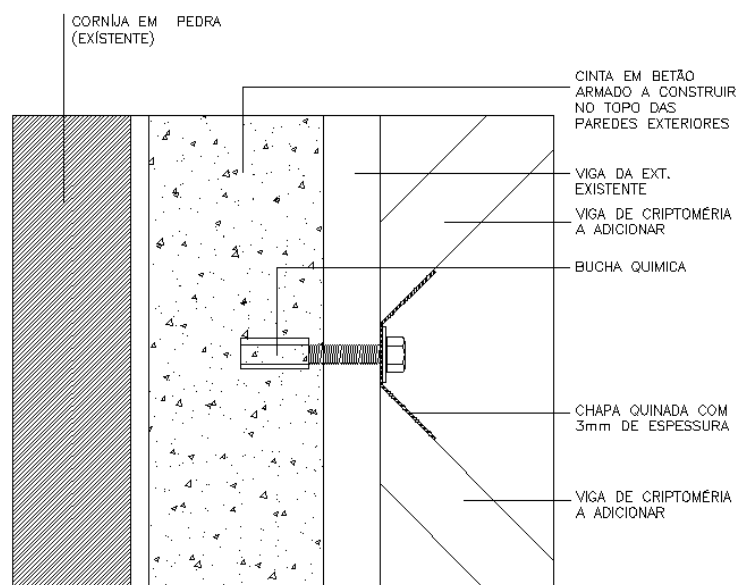


Figura 87 - Cortes horizontais [32].

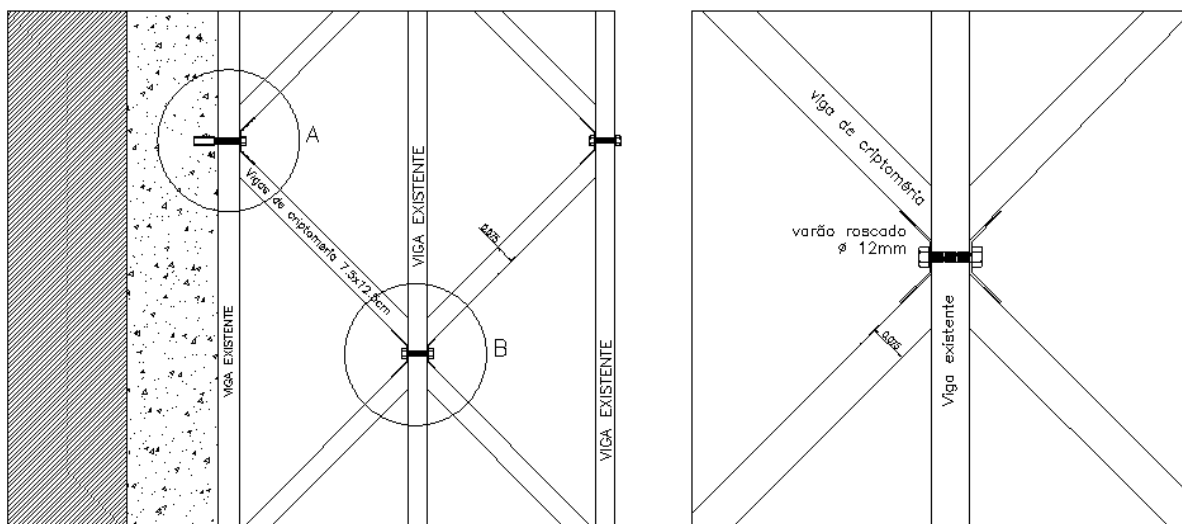


Figura 88 - Cortes horizontais [32].

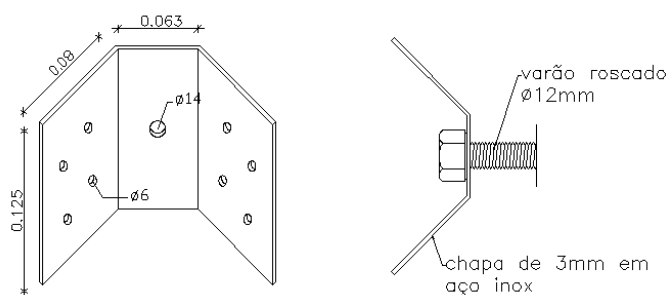


Figura 89 - Chapa quinada de ligação entre diagonais [32].

8.3.4. Reforço das Torres Sineiras

As torres sineiras são elementos estruturais de grande valor no património religioso, pois são elementos históricos que devem ser sempre preservados, daí a grande relevância do seu reforço. No entanto são também elementos com grande importância estrutural, pois interferem com grande parte da estrutura, merecendo assim uma atenção característica.

De seguida apresentam-se as várias técnicas de reforço relacionadas com as torres sineiras do património religioso.

i. Reforço da Fundação das Torres

O reforço das fundações das torres foi efetuado através de uma cinta de betão armado envolvente à mesma, em que primeiramente retiraram-se as pedras pequenas da superfície da fundação para que o betão conseguisse atingir todos os espaços livres de forma a consolidar a mesma, tal como se pode observar na Figura 90.

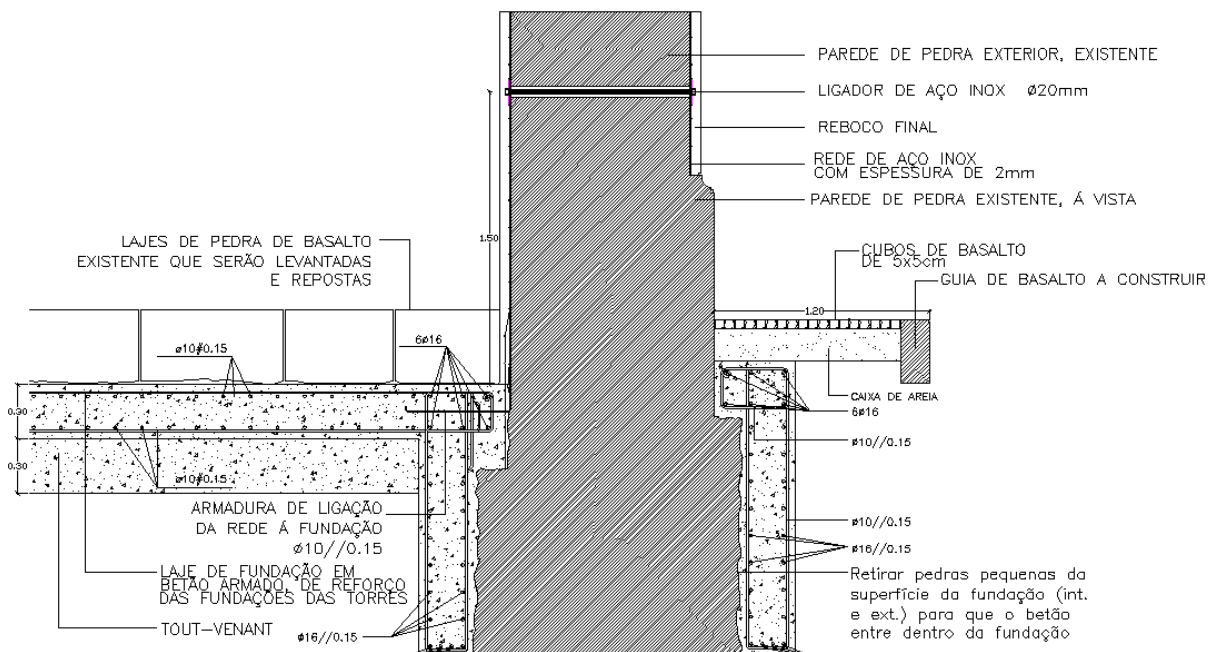


Figura 90 – Reforço da fundação das torres [31].

Por último efetuaram-se os devidos acabamentos, sendo os interiores com lajes de pedra de basalto existente, em que foram levantados para a execução da laje de fundação também em betão armado de reforço das fundações das torres, assim como a ligação da mesma à cinta envolvente. Em relação aos acabamentos exteriores, estes foram em cubos de basalto, Figura 90.

ii. Reforço do Piso das Torres

O reforço do piso das torres executou-se com aplicação de peças verticais de cantoneira de abas iguais fixas nos cantos interiores das paredes das torres, assim como reforços horizontais executados em cantoneiras de abas iguais nas faces inferiores e superiores cravadas nos pisos em laje de pedra de basalto, tal como se encontra ilustrado na Figura 91. Constata-se ainda na referida Figura o reforço das paredes tal como descrito anteriormente no ponto 8.3.2. - Reforço das Paredes.

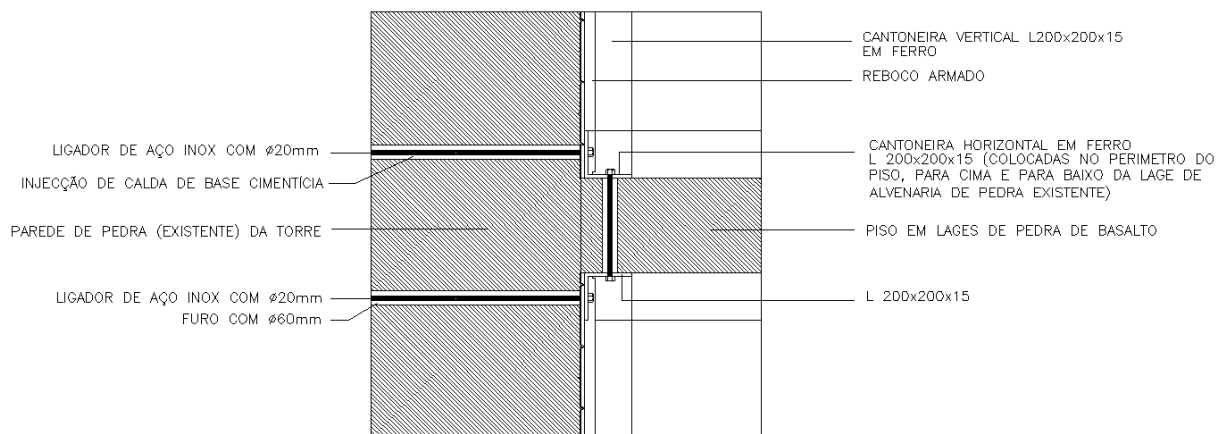


Figura 91 - Reforço do piso das torres [31].

Na ligação entre paredes recorreu-se também a tirantes metálicos embebidos e amarrados a chapas inox de dimensões acrescidas em obra. Figura 92.



Figura 92 - Amarração em aço inox dos tirantes de travamento [21].

iii. Reforço da peça decorativa no topo das torres

A peça decorativa no topo das torres é um elemento decorativo em basalto em que se encontra fixo à parede de pedra da torre com resina epoxy, sendo utilizados dois varões por cada elemento, Figura 93, verificando-se também o reforço da parede da torre com a substituição do reboco existente por reboco armado.

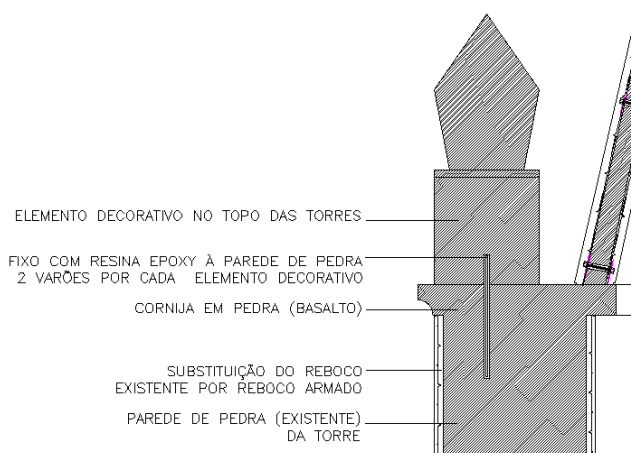


Figura 93 – Reforço da peça decorativa no topo das torres [31].

iv. Reforço do Frontispício

O frontispício é um caso típico de elemento não estrutural que deve ser estabilizado pelos danos após os eventos sísmicos. Este é um elemento isostático que se encontra apoiado sobre a parede frontal ao nível da cimalha. No caso da igreja das Bandeiras este sofreu fissuração precisamente ao longo do traço da cobertura no plano do próprio frontispício, daí este elemento ter sido reforçado pela técnica do reboco armado e ligado adequadamente às torres, Figura 94.

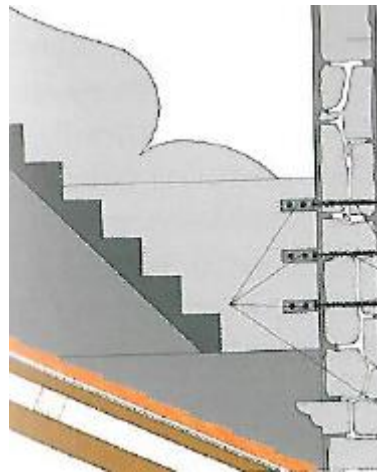


Figura 94 - Ligação do frontispício à torre [21].

Na Figura 95, referente ao alçado ilustrado na Figura 94 constata-se o reforço da intersecção de duas paredes correspondentes à torre e ao frontispício, através da utilização de varões atravessando transversal e diagonalmente o nó de paredes, assim com a utilização de cantoneiras, chapas de fixação e ligadores já mencionados anteriormente no reforço de paredes.

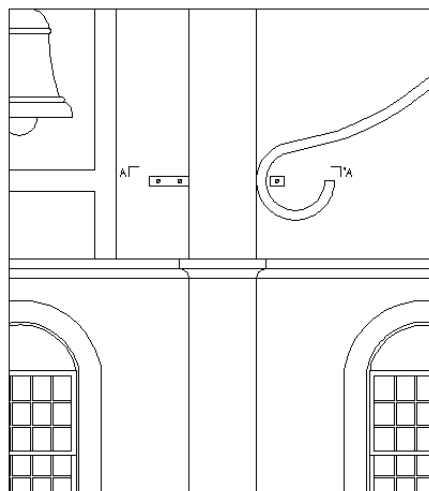


Figura 95 – Parte do Alçado frontal com a localização do reforço [31].

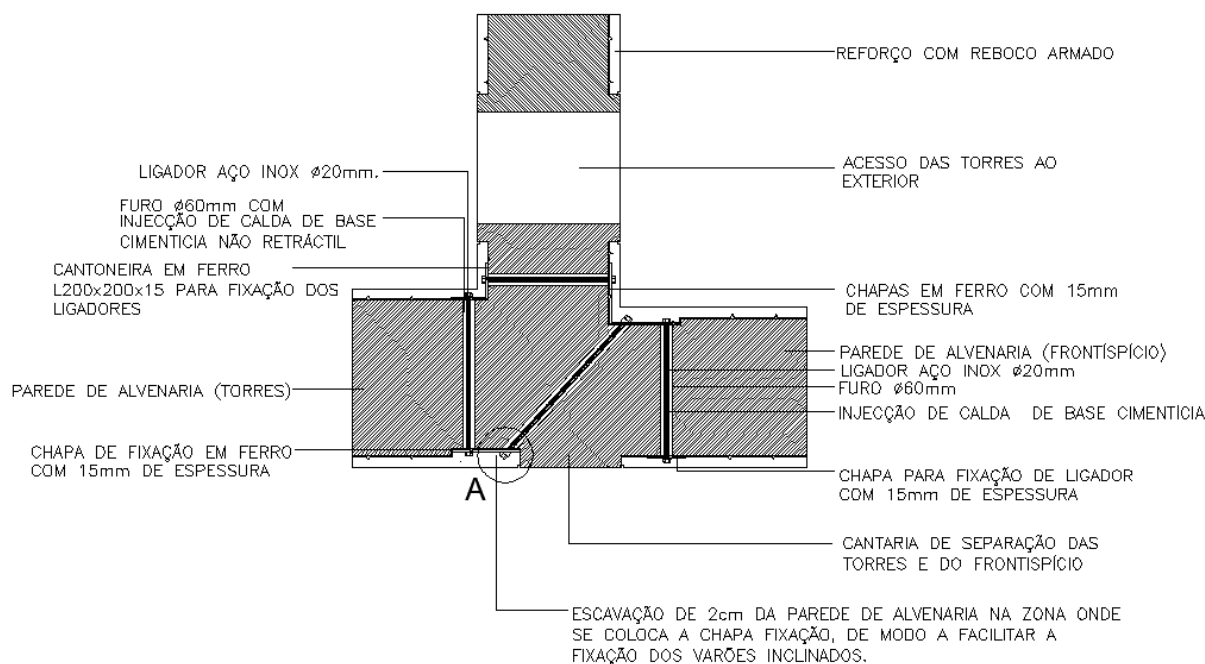


Figura 96 – Corte horizontal do Reforço do Frontispício [31].

Ainda na Figura 97 pode se observar o pormenor de fixação no reforço do frontispício através de um ligador de aço inox, injeção de calda de base cimentícia não retráctil e chapa de fixação em ferro, sendo a fixação de ligadores inclinados através de uma peça soldada.

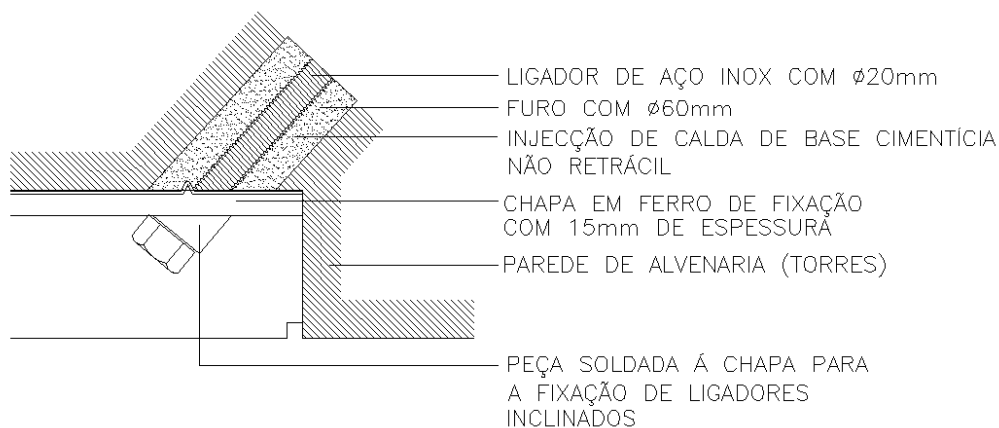


Figura 97 - Pormenor de fixação no reforço do frontispício [31].

8.3.5. Reforço dos Pináculos

À semelhança dos frontispícios os pináculos são elementos isostáticos em que o seu reforço é efetuado através de ancoragens na sua base ao patamar através de um varão de aço inox chumbado com resina epoxy na pedra de apoio tal como se encontra esquematizado na Figura 98 e 99.

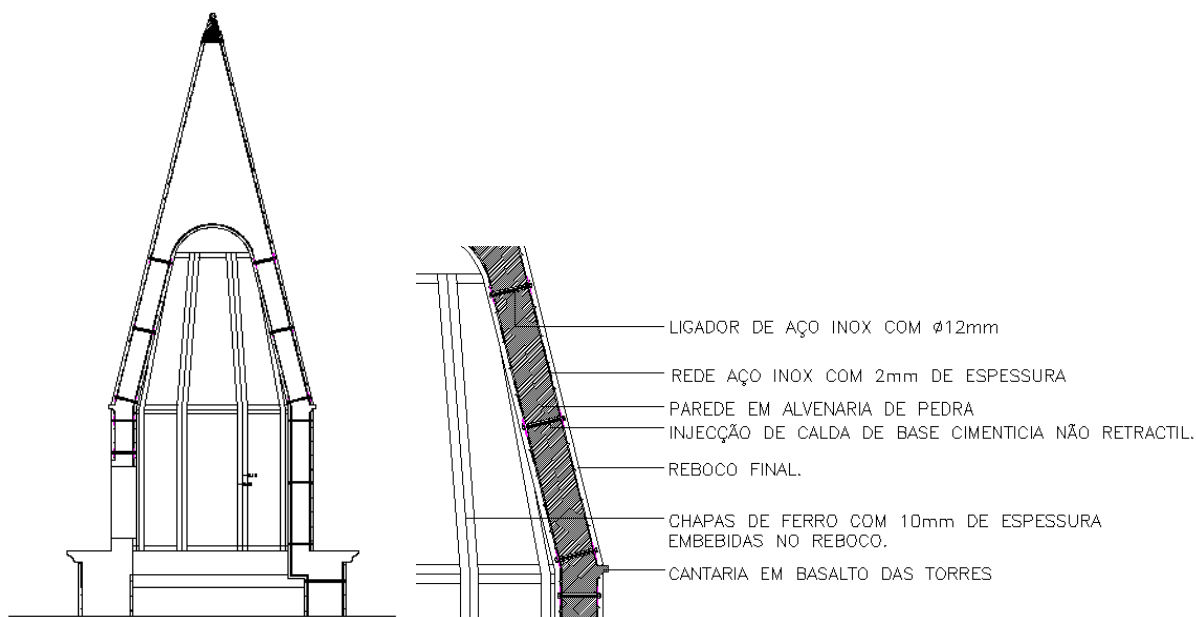


Figura 98 - Pináculo das torres [32].

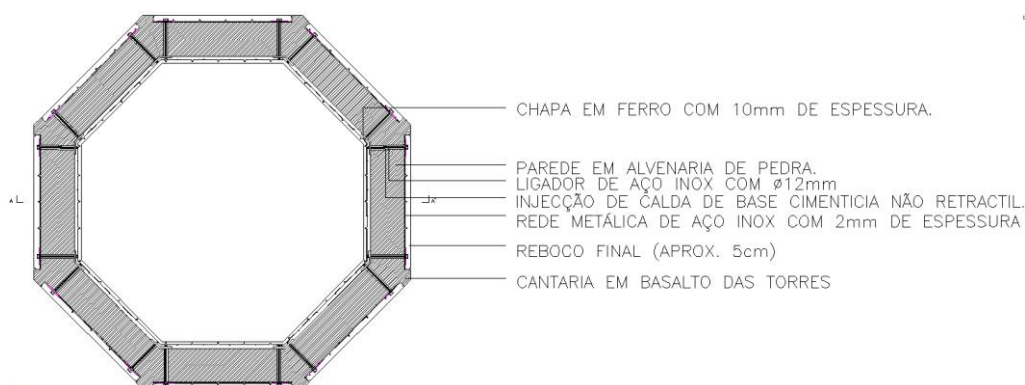


Figura 99 - Corte horizontal [32].

8.4. Estado de Conservação Atual

As Igrejas analisadas e descritas anteriormente, Igreja de Nossa Senhora da Boa Nova da freguesia das Bandeiras e Igreja de Santa Maria Madalena da freguesia da Madalena, encontram-se atualmente em bom estado de conservação.

Após a análise efetuada, incluindo a análise das técnicas de reforço aplicadas, constata-se que estas igrejas sofreram intervenções profundas, permitindo assim um bom desempenho face ao comportamento sísmico, bem como ao nível visual, tendo em conta que foram técnicas bem conseguidas possibilitando assim que se mantivessem as características únicas que este Património possui, pois muitas vezes a importância destes aspetos é desprezada.

Em relação à sua estrutura estas encontram-se em ótimo estado, não apresentando qualquer tipo de dano.

Pode-se apenas referir que as respetivas igrejas apresentam algumas patologias relacionadas com a humidade, pois esta é uma Região com um nível de humidade elevado, tornando-se uma patologia frequente, especialmente em edifícios de alvenaria de pedra, sendo este o caso. Na Figura 100 encontram-se ilustrados alguns destes casos.



Figura 100 - Patologia relacionada com a humidade.

8.5. Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica, Igrejas da Madalena e Bandeiras

O comportamento sísmico de um edifício é complexo dado que a sua resposta à ação sísmica resulta da combinação de múltiplos fatores relacionados com a estrutura resistente e as suas propriedades dinâmicas, com as propriedades mecânicas dos materiais e o comportamento dos elementos, e ainda com a geometria do edifício e a sua envolvente. A vulnerabilidade sísmica do edifício resulta, em última análise, da conjugação, no sentido favorável ou desfavorável, destes fatores.

Posteriormente é efetuada uma análise dos resultados obtidos no cálculo da vulnerabilidade sísmica antes da aplicação das técnicas de reforço no Capítulo 7 e dos resultados obtidos no presente Capítulo no cálculo da vulnerabilidade sísmica após a aplicação das técnicas de reforço.

8.5.1. Vulnerabilidade sísmica, Igrejas da Madalena e Bandeiras pré-reforço

Anteriormente, no Capítulo 7, mais concretamente no ponto 7.2.1.1., foi descrito e demonstrado o cálculo do índice de dano, índice de vulnerabilidade e índice de segurança de todo o património religioso das Ilhas do Pico e Faial, relativamente aos danos observados e à vulnerabilidade associada a cada macro-elemento após a ocorrência do sismo em estudo e antes da aplicação das técnicas de reforço.

Este cálculo é efetuado após a identificação de todos os mecanismos de dano relacionando os mesmos com vários parâmetros relativos à importância atribuída a cada mecanismo, ao nível de dano de cada mecanismo, às limitações ou defeitos construtivos que possam favorecer a ativação do mecanismo de dano, às disposições construtivas que podem minimizar o aparecimento do mecanismo, à importância da igreja e à relação entre o solo e a zona sísmica em análise.

Na Figura 101 encontra-se ilustrado um gráfico com os resultados obtidos nas Igrejas da Madalena e Bandeiras antes da aplicação das técnicas de reforço.

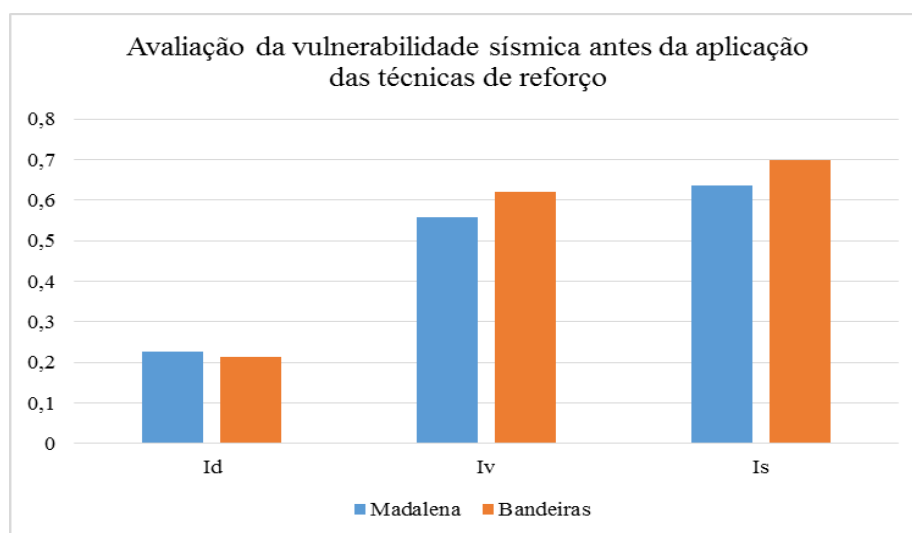


Figura 101 - Valores obtidos na avaliação das igrejas antes da aplicação das técnicas de reforço.

Pode-se constatar que os resultados obtidos para estas duas igrejas são muito idênticos. Relativamente ao Id (Índice de dano) não atingiram o valor limite, 0,3, assim encontram-se em condições de serem utilizadas, em relação à sua vulnerabilidade verifica-se que a igreja das Bandeiras encontra-se mais vulnerável, tendo em conta que o seu valor limite é 1, para

finalizar o I_s (Índice de segurança) apresenta um valor bastante próximo de 1, o que significa que estas duas igrejas não teriam condições de suportar um novo sismo.

Perante estes resultados torna-se evidente a necessidade de aplicação de técnicas de reforço sísmicas para que as mesmas apresentem as condições de segurança necessárias para os seus utentes.

8.5.2. Vulnerabilidade sísmica após a aplicação das técnicas de reforço, Igrejas da Madalena e Bandeiras

Após os resultados obtidos no ponto 7.2.1.1. foram estudadas as técnicas de reforço adequadas a cada mecanismo de dano, mencionadas e descritas no ponto 8.3. deste Capítulo. Depois da sua aplicação, na presente dissertação foram realizados os parâmetros de cálculo, considerando as alterações introduzidas na estrutura, de forma a analisar o efeito destas alterações na vulnerabilidade sísmica das igrejas.

As alterações dos parâmetros utilizados para este cálculo estão relacionadas com as técnicas de reforço. Estas técnicas permitem tornar a estrutura do edifício menos vulnerável, pois são edifícios antigos apresentando-se com um nível de degradação elevado. Tendo em conta que os parâmetros de cálculo estão relacionados com tudo o que envolve os mecanismos de dano, bem como com as disposições construtivas da estrutura, as técnicas de reforço têm um peso elevado no resultado final desta avaliação.

No Anexo I apresentam-se os valores considerados em todos os parâmetros para o cálculo da vulnerabilidade sísmica da Igreja da Madalena e Bandeiras e os resultados obtidos, após a aplicação das fórmulas mencionadas e descritas anteriormente no ponto 7.2.1.1. do Capítulo 7, bem como na Figura 103.

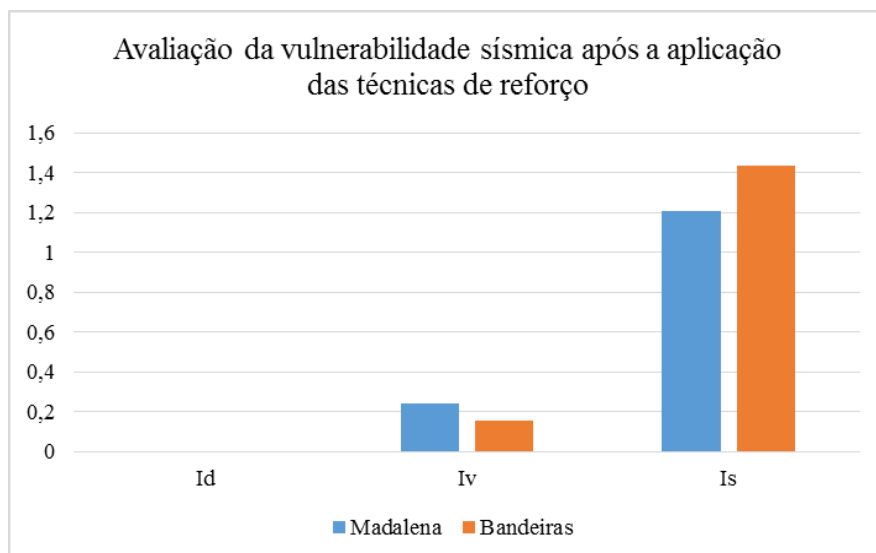


Figura 102 - Valores obtidos na avaliação das igrejas após a aplicação das técnicas de reforço.

Após a análise dos resultados obtidos pela avaliação da vulnerabilidade sísmica da Igreja da Madalena e da Igreja das Bandeiras, pode-se observar que as duas têm uma redução significativa do Iv, apresentando valores muito inferiores a 1, sendo neste caso o valor máximo, relativamente ao Is apresentam um valor superior a 1, sendo este o valor mínimo para que a estrutura apresente todas as condições de segurança necessárias. Em relação ao índice de dano constata-se que as duas igrejas encontram-se em perfeitas condições para a sua utilização, pois o seu valor é 0, sendo o seu limite 0,3.

Tendo em conta que o método aplicado na execução das técnicas de reforço foi idêntico nas duas Igrejas, bem como os danos ocorridos face ao sismo em análise no presente trabalho, devido aos métodos e tipologia de construção e aos materiais aplicados, descritos anteriormente, os danos ocorridos apenas variaram de acordo com a intensidade do sismo que se fez sentir, com a sua localização e com o estado de degradação em que cada Igreja se encontrava.

Face ao exposto e aos resultados obtidos, verifica-se que a Igreja das Bandeiras apresenta um melhor resultado perante o comportamento sísmico, tal situação relaciona-se com a sua geometria, pois esta é uma Igreja mais baixa, com uma fachada ampla e altura razoável, com torres menos elevadas, apresentado assim menor peso, facilitando o seu comportamento face ao sismo, apesar de apresentar aberturas nas faces da torre.

Relativamente à Igreja das Madalena, esta apresenta uma fachada com altura elevada, tornando as suas torres elementos sensíveis devido à sua altura, resultando assim num

comportamento sísmico mais sensível e, conseqüentemente, a sua vulnerabilidade sísmica mais baixa face à Igreja das Bandeiras, importar salientar que apresenta igualmente à Igreja das Bandeiras aberturas nas faces da torre, tornando-se assim mais vulnerável devido à sua altura.

Constata-se também que o método de inspeção das Igrejas é uma ferramenta fundamental para a análise do estado das mesmas, pois só assim se consegue aplicar este método para o cálculo da sua vulnerabilidade sísmica, e conseqüentemente definir a sua possibilidade de utilização após a ocorrência de um sismo, definindo as prioridades para se poder intervir nas referidas Igrejas.

8.5.3. Análise do antes e após da aplicação das técnicas de reforço no resultado da vulnerabilidade sísmica

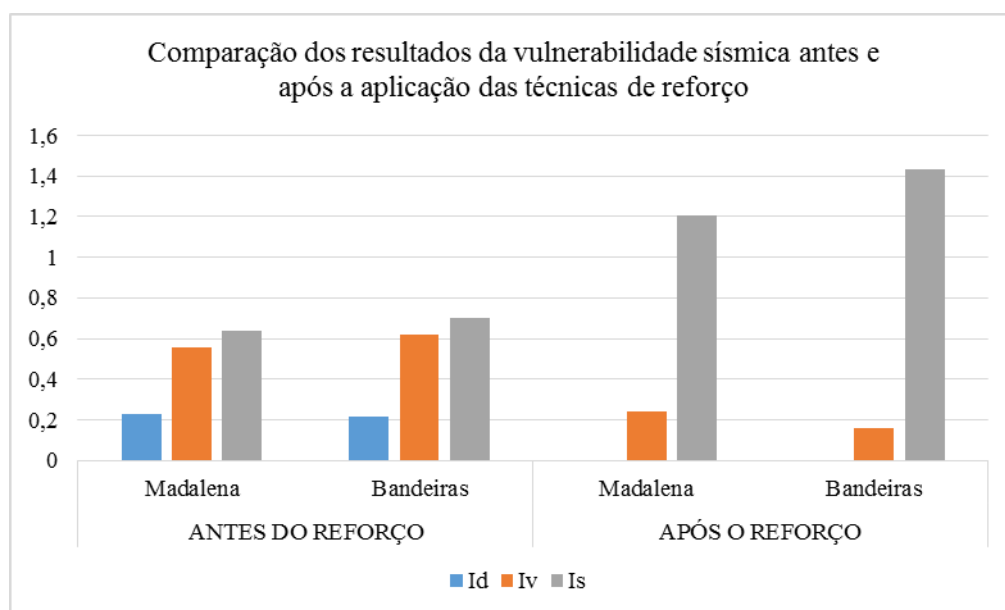


Figura 103 - Comparação dos resultados obtidos antes e após a aplicação das técnicas de reforço.

Observando a Figura 104, em relação aos resultados obtidos pelo João Magalhães [29], antes da aplicação das técnicas de reforço sísmico, nota-se evidentemente uma grande alteração face ao comportamento sísmico destas Igrejas após a aplicação das técnicas de reforço, pois antes da sua aplicação as respetivas Igrejas encontravam-se possíveis para utilização mas sem resistência à ação sísmica, caso ocorresse outro sismo idêntico ao de 9 de julho de 1998. Assim, consegue-se notar a importância do reforço sísmico face à ocorrência de um sismo.

Esta alteração nos resultados está relacionada com a alteração dos parâmetros de cálculo e

consequentemente com as técnicas aplicadas, pois as soluções tecnológicas ou construtivas atenuam o aparecimento do mecanismo de dano, ou seja, são medidas sísmicas que impedem a ocorrência de danos. Relativamente aos indicadores de vulnerabilidade, estes estão relacionados com situações ou fragilidades construtivas que favorecem a ativação do mecanismo de dano, assim, após aplicação das técnicas de reforço estes indicadores diminuem, tendo em conta que a estrutura encontra-se mais resistente.

Face ao exposto, nota-se evidentemente que as técnicas de reforço aplicadas na estrutura permitem a alteração dos parâmetros de cálculo de uma forma positiva, contribuindo de forma muito significativa para a redução da vulnerabilidade sísmica.

8.6. Conclusão

As obras de reabilitação apresentam duas grandes desvantagens comparativamente à construção nova, por um lado os prazos que se estabelecem para a conclusão dos trabalhos, que obrigam a acelerar o seu processo construtivo, tornando-se assim incompatível com os cuidados exigidos na execução de um trabalho de qualidade, e por outro a falta de sensibilidade por parte do pessoal de obra para o aparecimento frequente de novos elementos arquitetónicos e estruturais, que fazem parte do código genético da construção tradicional e não podem ser ignorados.

A realidade inflexível da recorrência sísmica que se verifica no Arquipélago dos Açores afeta predominantemente o parque edificado, com maior incidência nas construções de alvenarias de pedra. Ao contrário daquilo que se pensa as construções não são apenas atingidas pelos sismos de grande intensidade, os abalos de pequena e média escala afetam significativamente o comportamento das construções, comprometendo-as no futuro, uma vez que provocam patologias quase impercetíveis, como desconexões, fissuras e desvios. A origem destes danos permanentes deve-se sobretudo à duração do sismo, ao número de réplicas e à existência de uma importante componente vertical. Neste sentido, verificou-se que muitos edifícios tinham deficiências provocadas por sismos anteriores e que as reparações realizadas na altura não terão sido tão profundas e adequadas como seriam desejáveis, condicionando fortemente o seu desempenho nas crises sísmicas estudadas.

Apesar destas igrejas terem sofrido um reforço generalizado em toda a estrutura, a estratégia

adotada foi cuidadosa, tendo sido mantido o conceito original da estrutura existente, bem como não foram introduzidos novos elementos estruturais estranhos ao funcionamento original da construção.

A seleção de soluções de reabilitação e reforço são o resultado de uma análise global e de investigação, iniciando-se pela avaliação da segurança presente e depois os níveis alcançados como resultado da ação. As soluções de reforço aplicadas nestas igrejas, afetadas pelo sismo de 1998, foram todas muito semelhantes, tendo em conta que o seu método construtivo, bem como os materiais empregados nas mesmas eram muito idênticos, daí consequentemente os danos ocorridos pelo abalo sísmico.

Neste tipo de construção, os elementos estruturais principais, fundamentais para a ausência da vulnerabilidade sísmica, passam pelas boas ligações entre estes elementos, pois só assim se consegue garantir que os mesmos funcionem em conjunto quando atuados pelo movimento sísmico. Assim, deve-se assegurar a continuidade dos diversos elementos estruturais, tais como as paredes, pisos e coberturas, certificando as conexões entre os mesmos.

No entanto, importa referir que o reforço de todo o edifício é crucial para que o mesmo funcione com toda a segurança perante os eventos sísmicos.

Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros

Neste Capítulo pretende-se expor as conclusões e aspetos fundamentais adquiridos no decorrer da elaboração deste estudo, tendo em conta o principal objetivo da presente dissertação, sendo este a elaboração de uma análise do que foi feito e do estado em que se encontra o Património Religioso dos Açores, que grande parte deste já sofreu intervenções de reabilitação e reforço devido aos sismos ocorridos. Assim, estudou-se de uma forma exaustiva todo o processo efetuado até à execução das referidas intervenções, através de um estudo desde o sismo até às técnicas de reforço aplicadas, passando pela tipologia de construção, pelos danos ocorridos nas estruturas, associando os mesmos ao tipo de materiais utilizados.

O Arquipélago dos Açores é conhecido pelas suas características únicas, quer positivamente, quer negativamente, desde a sua beleza singular aos riscos naturais que o assolam. Tais fenómenos tornam esta Região conhecida pela sua insularidade, no entanto com o passar dos anos, e conseqüentemente com a evolução da sociedade todas estas particularidades foram-se tornando mais fáceis de ultrapassar.

Um dos riscos naturais mais alarmante para a população açoriana passa pela ocorrência de sismos, pois são fenómenos naturais incontroláveis e impossíveis de evitar. Perante tal situação torna-se imprescindível a aposta nas medidas preventivas, especialmente nas estruturas mais antigas, com o intuito de diminuir os danos que possam ocorrer deste tipo de fenómeno.

O sismo analisado ao longo do presente estudo foi dos mais problemáticos em termos de danos, tendo sido considerado um dos mais catastróficos da história recente dos Açores, nomeadamente em relação ao património religioso, este foi um tipo de estrutura muito atingida, pois eram estruturas antigas em alvenaria de pedra, encontrando-se num elevado estado de degradação dos seus materiais, bem como os seus processos construtivos antigos, sem considerar medidas antissísmicas fundamentais perante tais acontecimentos.

Com a ocorrência deste sismo foi possível efetuar um levantamento exaustivo de todas as situações que sucederam de forma a garantir que a reabilitação deste património fosse efetuada adequadamente perante a realidade desta Região, bem como os meios possíveis atualmente para uma boa construção antissísmica.

Este tipo de património caracteriza-se pelas suas particularidades construtivas, tornando-se em edifícios de elevada vulnerabilidade, devido à existência de grandes vãos, grandes alturas interiores e elementos estruturais extremamente esbeltos, requerendo assim técnicas construtivas especiais e materiais de melhor qualidade, face ao existente na época da sua construção.

O material predominante do respetivo património é a pedra, especialmente a basáltica, pelo facto de ser a mais abundante nesta Região e também pelas suas características, pois possui diversas aplicabilidades e é um material resistente. No entanto, utilizavam-se outros materiais, tais como: mistura de “barro”, areia-da-terra e água para as argamassas, a madeira na execução de variados elementos estruturais, tais como: coberturas, pavimentos acabamentos como portas, ombreiras, vergas, rodapés e escadarias, sendo o Pinho Bravo o mais utilizado.

Na sua generalidade a construção das Igrejas baseava-se num corpo principal com uma nave central e duas laterais com menores dimensões, sendo a zona do altar situada no prolongamento da nave central. O corpo principal era composto por um sistema de arcos orientados segundo as direções transversais e longitudinais. O topo da fachada apresentava-se com um frontão de dimensões significativas, apresentando ainda pelo menos uma torre ligada ao corpo principal.

Devido à sensibilidade deste tipo de estruturas torna-se fundamental o desenvolvimento de estratégias de inspeção, bem como o registo de toda a informação, pois só assim se consegue compreender o estado das igrejas após a ocorrência de um sismo, a sua possibilidade de utilização, assim como uma análise das prioridades e fragilidades de cada macro-elemento a ter em conta nas futuras intervenções de reforço da estrutura, e conseqüentemente diminuição do risco sísmico.

Com a avaliação da vulnerabilidade sísmica, baseada na metodologia apresentada pelo GNNT

(Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terramoti), identificaram-se 28 mecanismos de dano associados ao comportamento dos diferentes macro-elementos que constituem a igreja perante a ação sísmica. Estes mecanismos foram identificados com recurso a um levantamento dos danos e avaliação da vulnerabilidade sísmica através do conhecimento geral da estrutura, a classificação dos diferentes mecanismos de dano observado, bem como a avaliação da vulnerabilidade da igreja associada a cada mecanismo, finalizando-se com o cálculo da avaliação da vulnerabilidade.

Importa salientar que foram ainda utilizadas outras metodologias com procedimentos mais simples, que passaram pela avaliação com registo fotográfico e por inspeção de igrejas, onde se concluiu que todas as igrejas possuíam coro alto, apresentando na sua maioria danos relacionados com o comportamento sísmico dos restantes macro-elementos, levando assim à introdução deste novo mecanismo de dano, o 29.

Após toda a recolha e análise da informação relacionada com os mecanismos de dano, bem como o cálculo da vulnerabilidade sísmica das Igrejas, obteve-se toda a informação necessária para se proceder ao estudo das técnicas de reforço a empregar neste tipo de estruturas de forma a garantir a segurança sísmica necessária.

Relativamente às técnicas de reforço aplicadas e com base nos resultados obtidos pelo cálculo da vulnerabilidade sísmica das duas Igrejas após a aplicação das referidas técnicas, constata-se que estas encontram-se aptas para utilização garantindo as condições de segurança necessárias relativamente ao seu comportamento sísmico, tendo em conta que apresentaram valores dentro dos parâmetros definidos para tal. Os respetivos valores foram determinados com bases nos 29 mecanismos de dano, analisados e descritos no Capítulo 6, associados às técnicas de reforço descritas no Capítulo 8.

Através dos referidos resultados, verificou-se também que a Igreja das Bandeiras apresenta um melhor comportamento sísmico face à Igreja da Madalena, estando este resultado associado à sua geometria e características de alguns elementos estruturais.

Todo trabalho desenvolvido ao longo do presente trabalho relacionou-se com o reforço sísmico do Património Religioso do Arquipélago dos Açores, devido à sua elevada importância, e área merecedora do seu devido reconhecimento. No entanto a reabilitação de

um edifício não passa somente pela aplicação de técnicas de reforço, neste caso sísmico, existe outro tipo de patologia relevante que deve merecer igualmente especial atenção, tal como os graves problemas de humidade que se fazem sentir nas alvenarias de pedra, sendo estas utilizadas neste tipo de Património, patologia esta referida anteriormente relativamente ao estado de conservação atual das Igrejas. Assim, deixo presente uma proposta para desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados com a análise desta situação e/ou desenvolvimento de soluções que permitam diminuir estes problemas de humidade.

Bibliografia

[1] – Arêde, A.; Costa, A – “Strengthening of structures damaged by the Azores earthquake of 1998”, (p.17), Science Direct, 2006.

[2] – Arêde, A.; Costa, A.; Costa, A. A.; Oliveira, S. C.; Neves, F. – “Caracterização experimental do sistema construtivo do grupo central do Arquipélago Açoreano - uma construção para avaliação e redução da sua vulnerabilidade sísmica”, 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, (p.13), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade de Aveiro, Instituto Superior Técnico, 2007.

[3] – Câmara, F. M. – “Evolução das soluções de reabilitação recente nos Açores motivada pela atividade sísmica”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, 2010.

[4] – Costa, A.; Oliveira, C. S.; Neves, F. – “Soluções estruturais mais frequentes nas reabilitações das construções afetadas pelo sismo de 1998 na Ilha do Faial”, 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, (p.10), Universidade de Aveiro, Instituto Superior Técnico, 2007.

[5] – Guerreiro, L.; Azevedo, J.; Proença, J.; Bento, R.; Lopes, M. – “Danos verificados em Igrejas durante o Sismo dos Açores de Julho de 1998 ”, Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, (p.10), Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.

[6] – J. F. B.; Bezzeghoud. M.; Bufom, E.; Pro, C.; Fitas, A. – “The 1980, 1997 and 1998 Azores earthquakes and some seismo-tectonic implications”, Science Direct, (p. 18), 2007.

[7] – Magalhães, M. J.; Vicente, R.; Ferreira, T.; Costa, A.; Varum, H.; Lagomarsino, S.; Curti, E. – “Seismic vulnerability of churches in Faial and Pico islands, Azores”, (p.8), University of Aveiro, Portugal; University of Genova, Italy, 2004.

[8] – Martins, N. C. – “Análise de Soluções de Reforço Usadas na Reabilitação da Ilha do Faial”, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Aveiro, 2009.

[9] – Moreira, D.; Neves, N.; Arêde, A.; Costa, A. – “Análise Sísmica da Igreja da Madalena na Ilha do Pico”, Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, (p.12), Faculdade de Engenharia da Universidade do porto, 1999.

[10] – Neves, F.; Costa, A.; Vicente, R.; Oliveira, S. C.; Varum, H. – “Seismic vulnerability assessment and characterisation of the buildings on Faial Island, Azores”, Science Direct, (p.18), 2011.

[11] – Neves, N.; Moreira, D.; Arêde, A.; Costa, A. – “Análise Sísmica da Igreja das Bandeiras na Ilha do Pico”, Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, (p.14), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.

[12] – Nunes, C. J.; Camacho, A.; França, Z.; Montesinos, G. F.; Alves, M.; Vieira, R.; Ortiz, E. – “Gravity anomalies and Crustal signature of volcano-tectonic structures os Pico Islands (Azores)”, Science Direct, (p.16), 2006.

[13] – Nunes, C. J.; Forjaz, H. V.; França, Z. – “Principais Sismos Destrutivos no Arquipélago dos Açores - Uma Revisão”, Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, (p.13), Universidade dos Açores, Departamento de Geociência, Ponta Delgada, Açores, 1999.

[14] – Pedrosa, L.; Vicente, A.; Silva, C. V.; Lourenço, P.; Orduña, A. – “Maximizar o Estudo, Minimizar a Intervenção com Forma de Salvar o Património Arquitectónico. O Exemplo da Igreja de S. Francisco, Horta”, Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, (p. 13). Universidade do Minho, 1999.

[15] – Rodrigues, M. C. – “Variação da sismicidade ao longo do ano na Região dos Açores”,

7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, (p.19), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2007.

[16] – Consulta em “<http://musicatradicional.no.sapo.pt/acoresh.html>”.

[17] – Consulta em “<http://gracieteoliveira.pbworks.com/w/page/45769694/Sismologia>”.

[18] – Consulta em “<http://www.correiodosacoresh.net/view.php?id=25108>; http://desertosedesertificacao.blogspot.pt/2008_04_01_archive.html; <http://geocrusoe.blogspot.pt/2010/09/paisagem-vulcanica-da-ilha-do-pico.html>”.

[19] – Consulta em “<http://blacksmoker.wordpress.com/2010/01/16/isossistas-no-mar/>”.

[20] – Consulta em “<http://www.flickrriver.com/photos/cfpinto73/4910472035/>”.

[21] – Oliveira, C. S.; Costa, A.; Nunes, J. C. – “Sismo 1998 – Açores, Uma Década Depois”, 2008.

[22] – Consulta em “http://www.ine.pt/scripts/flex_definitivos/Main.html” - Acesso a [06/12/2013](http://www.ine.pt/scripts/flex_definitivos/Main.html).

[23] – Alves, J. P. G. – “Estudo do Comportamento Dinâmico do Quartel dos Bombeiros das Lajes do Pico, Baseado no Sismo de 9 de Julho de 1998”, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

[24] – Oliveira, J. C. C. – “Soluções de reforço utilizadas na reparação/reabilitação da construção tradicional açoriana”, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

[25] – Martins, D.; Pereira M. – “Reforço Sísmico de Edifícios Antigos com Estrutura Metálica”, Instituto Politécnico de Leiria, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria, 2013.

[26] – Pereira, F. S. M. – “Estudo Sísmico de Edifícios Antigos – Reforço e Análise não Linear”, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

[27] – Miler Magalhães, J.; Vicente, R.; Costa, A.; Varum, H.; Lagomarsino, S.; Curti, E. – “Metodologia para Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica do Património Religioso: Caso de Estudo – Faial e Pico, Açores”, 8º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, (p.9), Universidade de Aveiro e Universidade de Genova, 2010.

[28] – Cimellaro, G. P.; Reinhorn, A. M.; Stefano, A. – “Introspection on improper seismic retrofit of Basilica Santa Maria di Collemaggio after 2009 Italian earthquake”, Science Direct, (p.9), 2011.

Anexos

ANEXO I

Cálculo da Vulnerabilidade Sísmica – Igreja das Bandeiras

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
FACHADA	1 - Rotação da fachada para fora do plano	Destacamento da fachada para fora do plano	1	Ligação longitudinal Elementos de contraste (contrafortes) Fixação de boa qualidade entre a fachada e as paredes laterais da nave	0 3 3	Elementos de impulsionamento (vigas do telhado, abóbadas, arcos) Grandes aberturas nas paredes laterais, junto às cantarias -	1 0 -	-5
	2 - Danos no topo da fachada	Destacamento do frontão com corte horizontal ou em forma de "V" - Desagregação da alvenaria ou mudança das vigas de amarração - Rotação das vigas	1	Ligações locais para a estrutura da cobertura Vigas de cobertura Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	3 3 2	Grandes aberturas (janelas) Torres elevadas, grandes e pesadas Vigas rígidas, vigas de cume e cobertura pesada.	0 0 2	-6
	3 - Corte na fachada	Corte diagonal - Corte vertical ou arqueado (rotação) - Outro tipo de corte	1	Tirantes na zona retaguarda da fachada Contraste lateral devido à inclinação do edifício	3 0	Aberturas amplas e em grande quantidade Elementos verticais esbeltos	2 0	-1
	4 - Danos na zona de entrada	Corte nos arcos ou na viga devido à rotação dos pilares - Destacamento da fachada	0,5	Tirantes Pilares com tamanho adequado	0 2	Arcos / abóbadas -	0 -	-2

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
NAVE	5 - Vibração transversal da nave	Corte transversal nos arcos, podendo estender-se às abóbadas - Rotação em paredes laterais - Corte e esmagamento dos pilares	1	Pilastras ou contrafortes exteriores	2	Paredes esbeltas	1	-2
				Inclinação adjacente de edifícios	1	Abóbadas e arcos	2	
				Tirantes transversais	2	-	-	
	6 - Corte nas paredes laterais	Corte diagonal (simples ou cruzado) - Corte na descontinuidade da parede	1	Alvenaria de boa qualidade, sem diferentes fases de construção	3	Grandes aberturas em zonas com espessura de alvenaria limitada	3	-2
				Bons vãos sobre as aberturas	2	Vigas muito rígidas e cobertura pesada.	2	
				Vigas leves (aço, alvenaria)	2	-	-	
	7 - Resposta longitudinal dos pilares	Corte nos arcos ou nos vãos longitudinais - Esmagamento / corte na base dos pilares - Corte nas naves laterais	1	Tirantes longitudinais	0	Abóbadas pesadas na nave central	3	6
				Contrafortes na fachada	0	Cobertura pesada, elevada espessura de betão nas abóbadas	3	
	8 - Abóbadas na nave	Corte na abóbada da nave central - Destacamento das abóbadas dos arcos	1	Tirantes	3	Concentração de cargas devido à estrutura da cobertura	2	0
				Contrafortes internos ou externos	3	Abóbadas finas, especialmente em grande extensão	2	
-				-	Interrupções ou irregularidades nas abóbadas	2		
9 - Abóbadas nos corredores	Corte nas abóbadas ou destacamento dos arcos nas paredes laterais	1	Tirantes	1	Concentração de cargas devido à estrutura da cobertura	1	-1	
			Contrafortes internos ou externos	2	Abóbadas finas, especialmente em grande extensão	1		
			-	-	Interrupções ou irregularidades nas abóbadas	0		

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
TRANSEPTO	10 - Destacamento da fachada do transepto	Destacamento da extremidade das paredes laterais - Deslocamento do frontão	1	Tirantes Elementos sustentados eficazes (contrafortes) Boa ligação com a cobertura (vigas) Boa qualidade da parede lateral com o fecho da fachada Vigas leves (aço, alvenaria)	0 1 2 1 0	Vigas rígidas, cobertura pesada Grandes aberturas na fachada ou paredes laterais Torres elevadas, grandes e pesadas - -	2 1 1 - -	0
	11 - Corte nas paredes do transepto	Corte diagonal (simples ou cruzado) - Corte na descontinuidade da parede	1	Alvenaria de boa qualidade, sem diferentes fases de construção Bons vãos sobre as aberturas Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	3 2 2	Vigas rígidas e cobertura pesada Grandes aberturas em zonas com espessura de alvenaria limitada -	2 2 -	-3
	12 - Abóbada no transepto	Corte nas abóbadas ou destacamento dos arcos nas paredes laterais	1	Tirantes Contrafortes internos ou externos -	1 1 -	Concentração de cargas devido à estrutura da cobertura Abóbadas finas, especialmente em grande extensão Interrupções ou irregularidades nas abóbadas	1 2 2	3
ARCO TRIUNFAL	13 - Danos no Arco Triunfal	Corte no arco - Deslizamento das cantarias - Esmagamento / corte na base do pilares	1	Paredes laterais rígidas (baixa ligação arco vão / largura da nave, transepto e outros macro elementos) Tirantes Pilares bem estruturados / espessura do arco adequada	2 0 3	Cobertura pesada Cúpula, tambor e tiburio -	1 1 -	-3

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
CÚPULA	14 - Cúpula, tambor e tibúrio	Corte na cúpula, com eventual continuação no tambor.	1	Anéis externos de reforço, em diferentes alturas	0	Grandes aberturas no tambor	0	0
				Contrafortes externos ou pilastras no tambor	0	Cargas concentradas devido ao revestimento da cobertura	0	
				Cúpula colocada diretamente sobre os arcos triunfais	0	-	-	
	15 - Clarabóia	Corte na clarabóia da cúpula - Rotação / deslocamento dos pilares	0,5	Tirantes ou anéis externos de reforço	0	Clarabóias esbeltas com grandes aberturas e pilares esbeltos	0	0
Pilastras ou contrafortes	0	-	-					
Clarabóio mais pequena que a cúpula	0	-	-					
ABSIDE	16 - Derrube da Abside	Corte vertical ou curvo das paredes da abside - Corte vertical ou poligonal da abside - Corte em forma de "U" na abside semi-circular	1	Anéis de reforço (abside semi-circular ou poligonal) ou tirantes (abside retangular)	3	Aberturas nas paredes	2	0
				Elementos que sustentam a estrutura (contrafortes)	0	Abóbadas	2	
				Cobertura arqueada	2	Vigas rígidas, cobertura pesada	1	
	17 - Mecanismo de corte na capela-mor da abside	Corte diagonal (simples ou cruzado) - Corte na descontinuidade da parede	1	Alvenaria de boa qualidade, sem diferentes fases de construção	3	Vigas rígidas, cobertura pesada	1	-3
Bons vãos sobre as aberturas	2	Grandes aberturas em zonas com espessura de alvenaria limitada	3					
Vigas leves (aço, alvenaria)	2	-	-					
18 - Abóbadas na capela-mor e na abside	Corte nas abóbadas ou destacamento dos arcos nas paredes laterais	1	Tirantes	0	Cargas concentradas devido ao peso da cobertura	2	3	
Contrafortes internos ou externos	0	Abóbadas finas, especialmente em grande extensão	1					
-	-	Janelas ou interrupções e irregularidades nas abóbadas laterais	0					

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
COBERTURA	19 - Mecanismo da cobertura: paredes laterais da nave e corredor	Corte junto às vigas de madeira; escorregamento das vigas - Destacamento dos tirantes e alvenaria - Deslocamento significativo do revestimento da cobertura	1	Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	3	Impulso na cobertura	3	-8
				Boa ligação em viga e parede	3	Vigas rígidas, revestimentos da cobertura pesado	1	
				Vigas da cobertura (madeira ou aço)	3	-	-	
				Boa ligação entre os elementos da cobertura	3	-	-	
	20 - Mecanismo da cobertura : transepto	Corte junto às vigas de madeira; escorregamento das vigas - Destacamento dos tirantes e alvenaria - Deslocamento significativo do revestimento da cobertura	1	Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	3	Impulso na cobertura	3	-8
				Boa ligação em viga e parede	3	Vigas rígidas, revestimentos da cobertura pesado	1	
				Vigas da cobertura (madeira ou aço)	3	-	-	
				Boa ligação entre os elementos da cobertura	3	-	-	
	21 - Mecanismo da cobertura : abside e capela-mor	Corte junto às vigas de madeira; escorregamento das vigas - Destacamento dos tirantes e alvenaria - Deslocamento significativo do revestimento da cobertura	1	Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	3	Impulso na cobertura	3	-8
Boa ligação em viga e parede				3	Vigas rígidas, revestimentos da cobertura pesado	1		
Vigas da cobertura (madeira ou aço)				3	-	-		
Boa ligação entre os elementos da cobertura				3	-	-		

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
CAPELAS	22 - Derrube da Capela	Destacamento da extremidade das paredes laterais	1	Elementos que sustentam a estrutura (contrafortes)	2	Fragilidade da parede devido a aberturas	3	-4
				Aneis de reforço ou tirantes	2	-	-	
				Boa qualidade de fixação da parede de fundo com a parede lateral	3	-	-	
	23 - Mecanismo de Corte nas paredes da Capela	Corte diagonal (simples ou cruzado) - Corte na descontinuidade da parede	1	Boa qualidade de alvenaria, sem diferentes fases de construção	3	Vigas rígidas, cobertura pesada	1	-4
				Bons vãos sobre as aberturas	2	Grandes aberturas, espessura de alvenaria limitada	2	
				Vigas leves (aço, alvenaria)	2	-	-	
	24 - Abóbadas nas Capelas	Corte nas abóbadas ou destacamento das paredes	1	Tirantes	2	Cargas concentradas devido ao peso da cobertura	1	-1
				Contrafortes internos ou externos	2	Abóbadas esbeltas, especialmente espessura	0	
				-	-	Janelas ou interrupções e irregularidades nas abóbadas	2	
EDIFÍCIOS ADJACENTES	25 - Interação com edifícios adjacentes	Deslocamento devido à descontinuidade da estrutura - Corte nas alvenarias devido a colisão	1	Ligações adequadas entre as diferentes fases de construção da	3	Grande diferença na rigidez entre edifícios	2	-1
				Conexão de tirantes	2	Concentração de ações sísmicas em elementos de ligação	2	
				-	-	-	-	
OBJETOS	26 - Projeções (Campanário, Pináculo, Estátuas)	Rotação ou deslocamento permanente - Corte	1	Conectores de ligação entre a projeção e a parede	3	Elementos esbeltos	3	-1
				Elementos de pequenas dimensões	1	Saliência de elementos nas paredes	2	
				Alvenaria monolítica	2	Assimetria de elementos em relação às estruturas subjacentes	0	

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
TORRE SINEIRA	27 - Danos na Torre Sineira	Corte na ligação entre a torre sineira e a igreja - Corte po escorregamento - Corte vertical ou curvo (saliências nas cantarias)	1	Qualidade uniforme da alvenaria (sem diferentes fases de construção) Tirantes e diferentes alturas Juntas adequadas entre as paredes (se adjacente) Boas ligações entre as paredes (se incorporado)	3 1 3 3	Grandes aberturas em diferentes alturas Suporte assimétrico na base da igreja (torres incorporadas) Elementos de suporte irregulares ao nível da torre (alguns arcos, paredes suspensas) -	3 0 3 -	-4
	28 - Danos no Campanário	Corte nos arcos - Rotação e escorregamento dos pilares	1	Pilares e / ou arcos com pequenas aberturas Tirantes ou anéis de reforço -	0 3 -	Cobertura pesada ou outro peso significativo Tirantes ou anéis de reforço -	2 3 -	2
CORO ALTO	29 - Dano no Coro Alto	Corte na ligação entre o altar e as paredes laterais - Dano nos elementos de suporte do altar (arcos ou pilares) - Corte nas abóbadas do Coro	1	Pilares ou arcos Estrutura muito leve (estrutura de madeira) Boa ligação entre o coro alto e as paredes laterais	3 3 3	Estrutura rígida Grandes aberturas (acesso à torre ou outra), alvenaria de espessura limitada -	2 2 -	-5

Parâmetro	Resultado	Condição
Viabilidade de utilização (I_d)	0	Possível de utilizar
Índice de Vulnerabilidade (I_v)	0,156463	$I_v < 1$ - Está do lado da segurança
Índice de Segurança (I_s)	1,432726	Suporta a ação sísmica

ANEXO II

Cálculo da Vulnerabilidade Sísmica – Igreja da Madalena

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
FACHADA	1 - Rotação da fachada para fora do plano	Destacamento da fachada para fora do plano	1	Ligação longitudinal	0	Elementos de impulsão (vigas do telhado, abóbadas, arcos)	1	-5
				Elementos de contraste (contrafortes)	3	Grandes aberturas nas paredes laterais, junto às cantarias	0	
				Fixação de boa qualidade entre a fachada e as paredes laterais da nave	3	-	-	
	2 - Danos no topo da fachada	Destacamento do frontão com corte horizontal ou em forma de "V" - Desagregação da alvenaria ou mudança das vigas de amarração - Rotação das vigas	1	Ligações locais para a estrutura da cobertura	3	Grandes aberturas (janelas)	0	-4
				Vigas de cobertura	3	Torres elevadas, grandes e pesadas	2	
				Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	2	Vigas rígidas, vigas de cumeeira e cobertura pesada.	2	
	3 - Corte na fachada	Corte diagonal - Corte vertical ou arqueado (rotação) - Outro tipo de corte	1	Tirantes na zona retaguarda da fachada	3	Aberturas amplas e em grande quantidade	1	-2
				Contraste lateral devido à inclinação do edifício	0	Elementos verticais esbeltos	0	
4 - Danos na zona de entrada	Corte nos arcos ou na viga devido à rotação dos pilares - Destacamento da fachada	0,5	Tirantes	0	Arcos / abóbadas	0	-2	
			Pilares com tamanho adequado	2	-	-		

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
NAVE	5 - Vibração transversal da nave	Corte transversal nos arcos, podendo estender-se às abóbadas - Rotação em paredes laterais - Corte e esmagamento dos pilares	1	Pilastras ou contrafortes exteriores	2	Paredes esbeltas	1	-2
				Inclinação adjacente de edifícios	1	Abóbadas e arcos	2	
				Tirantes transversais	2	-	-	
	6 - Corte nas paredes laterais	Corte diagonal (simples ou cruzado) - Corte na descontinuidade da parede	1	Alvenaria de boa qualidade, sem diferentes fases de construção	3	Grandes aberturas em zonas com espessura de alvenaria limitada	3	-2
				Bons vãos sobre as aberturas	2	Vigas muito rígidas e cobertura pesada.	2	
Vigas leves (aço, alvenaria)				2	-	-		
7 - Resposta longitudinal dos pilares	Corte nos arcos ou nos vãos longitudinais - Esmagamento / corte na base dos pilares - Corte nas naves laterais	1	Tirantes longitudinais	0	Abóbadas pesadas na nave central	3	6	
			Contrafortes na fachada	0	Cobertura pesada, elevada espessura de betão nas abóbadas	3		
8 - Abóbadas na nave	Corte na abóbada da nave central - Destacamento das abóbadas dos arcos	1	Tirantes	3	Concentração de cargas devido à estrutura da cobertura	2	0	
			Contrafortes internos ou externos	3	Abóbadas finas, especialmente em grande extensão	2		
			-	-	Interrupções ou irregularidades nas abóbadas	2		
9 - Abóbadas nos corredores	Corte nas abóbadas ou destacamento dos arcos nas paredes laterais	1	Tirantes	1	Concentração de cargas devido à estrutura da cobertura	1	-1	
			Contrafortes internos ou externos	2	Abóbadas finas, especialmente em grande extensão	1		
			-	-	Interrupções ou irregularidades nas abóbadas	0		

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
TRANSEPTO	10 - Destacamento da fachada do transepto	Destacamento da extremidade das paredes laterais - Deslocamento do frontão	1	Tirantes Elementos sustentados eficazes (contrafortes) Boa ligação com a cobertura (vigas) Boa qualidade da parede lateral com o fecho da fachada Vigas leves (aço, alvenaria)	0 1 2 1 0	Vigas rígidas, cobertura pesada Grandes aberturas na fachada ou paredes laterais Torres elevadas, grandes e pesadas - -	3 2 3 - -	4
	11 - Corte nas paredes do transepto	Corte diagonal (simples ou cruzado) - Corte na descontinuidade da parede	1	Alvenaria de boa qualidade, sem diferentes fases de construção Bons vãos sobre as aberturas Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	3 2 2	Vigas rígidas e cobertura pesada Grandes aberturas em zonas com espessura de alvenaria limitada -	3 2 -	-2
	12 - Abóbada no transepto	Corte nas abóbadas ou destacamento dos arcos nas paredes laterais	1	Tirantes Contrafores internos ou externos -	1 1 -	Concentração de cargas devido à estrutura da cobertura Abóbadas finas, especialmente em grande extensão Interrupções ou irregularidades nas abóbadas	2 2 2	4
ARCO TRIUNFAL	13 - Danos no Arco Triunfal	Corte no arco - Deslizamento das cantarias - Esmagamento / corte na base do pilares	1	Paredes laterais rígidas (baixa ligação arco vão / largura da nave, transepto e outros macro elementos) Tirantes Pilares bem estruturados / espessura do arco adequada	2 0 3	Cobertura pesada Cúpula, tambor e tibúrio -	1 1 -	-3

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
CÚPULA	14 - Cúpula, tambor e tibúrio	Corte na cúpula, com eventual continuação no tambor.	1	Anéis externos de reforço, em diferentes alturas Contrafortes externos ou pilastras no tambor Cúpula colocada diretamente sobre os arcos triunfais	0 0 0	Grandes aberturas no tambor Cargas concentradas devido ao revestimento da cobertura -	0 0 -	0
	15 - Clarabóia	Corte na clarabóia da cúpula - Rotação / deslocamento dos pilares	0,5	Tirantes ou anéis externos de reforço Pilastras ou contrafortes Clarabóia mais pequena que a cúpula	0 0 0	Clarabóias esbeltas com grandes aberturas e pilares esbeltos - -	0 - -	0
ABSIDE	16 - Derrube da Abside	Corte vertical ou curvo das paredes da abside - Corte vertical ou poligonal da abside - Corte em forma de "U" na abside semi-circular	1	Anéis de reforço (abside semi-circular ou poligonal) ou tirantes (abside retangular)	3	Aberturas nas paredes	2	1
				Elementos que sustentam a estrutura (contrafortes)	0	Abóbadas	2	
				Cobertura arqueada	2	Vigas rígidas, cobertura pesada	2	
	17 - Mecanismo de corte na capela-mor da abside	Corte diagonal (simples ou cruzado) - Corte na descontinuidade da parede	1	Alvenaria de boa qualidade, sem diferentes fases de construção Bons vãos sobre as aberturas Vigas leves (aço, alvenaria)	3 2 2	Vigas rígidas, cobertura pesada Grandes aberturas em zonas com espessura de alvenaria limitada -	2 3 -	-2
18 - Abóbadas na capela-mor e na abside	Corte nas abóbadas ou destacamento dos arcos nas paredes laterais	1	Tirantes Contrafortes internos ou externos -	0 0 -	Cargas concentradas devido ao peso da cobertura Abóbadas finas, especialmente em grande extensão Janelas ou interrupções e irregularidades nas abóbadas laterais	3 1 0	4	

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
COBERTURA	19 - Mecanismo da cobertura: paredes laterais da nave e corredor	Corte junto às vigas de madeira; escorregamento das vigas - Destacamento dos tirantes e alvenaria - Deslocamento significativo do revestimento da cobertura	1	Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	3	Impulso na cobertura	3	-7
				Boa ligação em viga e parede	3	Vigas rígidas, revestimentos da cobertura pesado	2	
				Vigas da cobertura (madeira ou aço)	3	-	-	
				Boa ligação entre os elementos da cobertura	3	-	-	
	20 - Mecanismo da cobertura : transepto	Corte junto às vigas de madeira; escorregamento das vigas - Destacamento dos tirantes e alvenaria - Deslocamento significativo do revestimento da cobertura	1	Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	3	Impulso na cobertura	3	-7
				Boa ligação em viga e parede	3	Vigas rígidas, revestimentos da cobertura pesado	2	
				Vigas da cobertura (madeira ou aço)	3	-	-	
				Boa ligação entre os elementos da cobertura	3	-	-	
	21 - Mecanismo da cobertura : abside e capela-mor	Corte junto às vigas de madeira; escorregamento das vigas - Destacamento dos tirantes e alvenaria - Deslocamento significativo do revestimento da cobertura	1	Vigas leves (aço, alvenaria reforçada)	3	Impulso na cobertura	3	-7
				Boa ligação em viga e parede	3	Vigas rígidas, revestimentos da cobertura pesado	2	
				Vigas da cobertura (madeira ou aço)	3	-	-	
				Boa ligação entre os elementos da cobertura	3	-	-	

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{ki} - V_{kp}$
CAPELAS	22 - Derrube da Capela	Destacamento da extremidade das paredes laterais	1	Elementos que sustentam a estrutura (contrafortes)	2	Fragilidade da parede devido a aberturas	3	-4
				Aneis de reforço ou tirantes	2	-	-	
				Boa qualidade de fixação da parede de fundo com a parede lateral	3	-	-	
	23 - Mecanismo de Corte nas paredes da Capela	Corte diagonal (simples ou cruzado) - Corte na descontinuidade da parede	1	Boa qualidade de alvenaria, sem diferentes fases de construção	3	Vigas rígidas, cobertura pesada	2	-3
				Bons vãos sobre as aberturas	2	Grandes aberturas, espessura de alvenaria limitada	2	
				Vigas leves (aço, alvenaria)	2	-	-	
24 - Abóbadas nas Capelas	Corte nas abóbadas ou destacamento das paredes	1	Tirantes	2	Cargas concentradas devido ao peso da cobertura	2	0	
			Contrafortes internos ou externos	2	Abóbadas esbeltas, especialmente espessura	0		
			-	-	Janelas ou interrupções e irregularidades nas abóbadas	2		
EDIFÍCIOS ADJACENTES	25 - Interação com edifícios adjacentes	Deslocamento devido à descontinuidade da estrutura - Corte nas alvenarias devido a colisão	1	Ligações adequadas entre as diferentes fases de construção da	3	Grande diferença na rigidez entre edifícios	2	-1
		Conexão de tirantes	2	Concentração de ações sísmicas em elementos de ligação	2			
		-	-	-	-			
OBJETOS	26 - Projeções (Campanário, Pináculo, Estátuas)	Rotação ou deslocamento permanente - Corte	1	Conectores de ligação entre a projeção e a parede	3	Elementos esbultos	3	-1
				Elementos de pequenas dimensões	1	Saliência de elementos nas paredes	2	
				Alvenaria monolítica	2	Assimetria de elementos em relação às estruturas subjacentes	0	

Localização do Dano	Mecanismo de Dano	Descrição do Dano	ρ_k	Medidas Sísmicas (V_{kp})	V_k (0-3)	Indicadores de Vulnerabilidade (V_{ki})	V_k (0-3)	$V_{Ki} - V_{Kp}$
TORRE SINEIRA	27 - Danos na Torre Sineira	Corte na ligação entre a torre sineira e a igreja - Corte po escorregamento - Corte vertical ou curvo (saliências nas cantarias)	1	Qualidade uniforme da alvenaria (sem diferentes fases de construção) Tirantes e diferentes alturas Juntas adequadas entre as paredes (se adjacente) Boas ligações entre as paredes (se incorporado)	3 1 3 3	Grandes aberturas em diferentes alturas Suporte assimétrico na base da rede da igreja (torres incorporadas) Elementos de suporte irregulares ao nível da torre (alguns arcos, paredes suspensas)	3 0 3 -	-4
	28 - Danos no Campanário	Corte nos arcos - Rotação e escorregamento dos pilares	1	Pilares e / ou arcos com pequenas aberturas Tirantes ou anéis de reforço -	0 3 -	Cobertura pesada ou outro peso significativo Tirantes ou anéis de reforço -	3 3 -	3
CORO ALTO	29 - Dano no Coro Alto	Corte na ligação entre o altar e as paredes laterais - Danoo nos elementos de suporte do altar (arcos ou pilares) - Corte nas abóbadas do Coro	1	Pilares ou arcos Estrutura muito leve (estrutura de madeira) Boa ligação entre o coro alto e as paredes laterais	3 3 3	Estrutura rígida Grandes aberturas (acesso à torre ou outra), alvenaria de espessura limitada -	2 2 -	-5

Parâmetro	Resultado	Condição
Viabilidade de utilização (I_d)	0	Possível de utilizar
Índice de Vulnerabilidade (I_v)	0,241497	$I_v < 1$ - Está do lado da segurança
Índice de Segurança (I_s)	1,206401	Suporta a ação sísmica