

METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DO PATRIMÓNIO RELIGIOSO: CASO DE ESTUDO – FAIAL E PICO, AÇORES

MILER MAGALHÃES, J.

Engenheiro Civil
Universidade de Aveiro
Aveiro - Portugal

VICENTE, R.

Professor Auxiliar
Universidade de Aveiro
Aveiro - Portugal

COSTA, A.

Professor Catedrático
Universidade de Aveiro
Aveiro - Portugal

VARUM, H.

Professor Associado
Universidade de Aveiro
Aveiro - Portugal

LAGOMARSINO, S.

Professor Catedrático
Universidade de Genova
Genova - Portugal

CURTI, E.

Bolseira
Universidade de Genova
Genova - Portugal

SUMÁRIO

Os sismos representam uma das grandes causas de danos graves e perda do património histórico e arquitectónico. Qualquer intervenção de reabilitação destes edifícios deve partir de uma cuidada avaliação e análise da sua vulnerabilidade sísmica, de modo a desenvolver, se necessário, estratégias de reforço sísmico adequadas. O principal objectivo do presente artigo é estudar a vulnerabilidade sísmica do património religioso das ilhas do Faial e do Pico, nos Açores. Para tal, numa primeira parte deste trabalho, é proposta uma metodologia para o 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. A partir da análise dos danos observados em dezasseis igrejas afectadas pelo sismo de 9 de Julho de 1998 nos Açores, é elaborada uma base de dados que, para além de reunir as características de cada igreja estudada, apoia o cálculo simplificado do índice de dano, vulnerabilidade e coeficiente de segurança global.

O campanário das torres sineiras é um elemento particularmente vulnerável aos sismos, devido à sua geometria típica. Por um lado, a existência de grandes aberturas a certos níveis produz tipicamente elementos verticais muito esbeltos. Por outro lado, a elevada concentração de massa no topo das torres também contribui para esta vulnerabilidade. Assim, na segunda parte deste trabalho, é aplicada a metodologia italiana, proposta na *Linee Guida per la Valutazione e Riduzione del Rischio Sísmico del Patrimonio Culturale*, aos campanários de duas igrejas localizadas na ilha do Pico, com base num modelo mecânico simplificado para a avaliação da vulnerabilidade deste tipo de estruturas.

Com o trabalho desenvolvido, pretende-se contribuir para uma sistematização de processos de inspecção e registo de informação relativa a igrejas, com vista a apoiar estratégias de intervenção quer em situações de pós-sismo, quer na mitigação do risco sísmico destas estruturas.

1. INTRODUÇÃO

Desde sempre, os sismos representam uma das grandes causas de danos graves e perda do património histórico e arquitectónico. A necessidade de salvaguardar estas construções passa pela compreensão e análise da sua vulnerabilidade sísmica que consequentemente sustenta as estratégias de reforço.

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 [Lagomarsino, 2006].

Segundo Roque [2002] 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 terremotos como se tivessem sido submetidas a autênticos ensaios sísmicos à escala real. A sismicidade do Arquipélago dos Açores, que decorre da actividade vulcânica e tectónica da crista Atlântica, é caracterizada por eventos com um número de sismos muito elevado. Este Arquipélago apresenta uma sismicidade histórica importante, como por exemplo, os sismos que afectaram a ilha de S. Miguel em 1522, 1810, 1852 e 1881, a ilha Terceira no ano de 1547, 1614, 1800, 1801 e 1841 e a ilha de S. Jorge e ilha do Pico em 1757. No século XX são de referir os eventos sísmicos de 8 de Maio de 1939, que afectaram principalmente as ilhas de S. Miguel e Santa Maria, o de Novembro de 1973 nas ilhas do Pico e Faial, o de 1 de Janeiro de 1980 nas ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa [NESDE, 2005].

Mais recentemente a 9 de Julho de 1998, um sismo de magnitude 6.2 na escala de Richter foi registado em quase todas as ilhas do Arquipélago, infligindo danos estruturais principalmente nas ilhas do Faial e do Pico [Guerreiro *et al.*, 2000]. Com epicentro localizado apenas a cerca de 5 km a Nordeste da ilha do Faial, como se ilustra na Figura 1: , este sismo provocou o colapso de cerca 700 imóveis e a destruição de inúmeras infra-estruturas públicas e igrejas. Na ilha do Faial, o sismo provocou 8 mortos e uma elevada percentagem da população perdeu as suas casas [Guerreiro *et al.*, 2000].



Figura 1: Localização do epicentro e isossistas de intensidade do sismo de 9 de Julho de 1998 (adaptado de [Oliveira, 1998])

As metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica de igrejas têm vindo a ser desenvolvidas, actualizadas e aperfeiçoadas pelo conhecimento adquirido nos diversos eventos sísmicos ao longo dos anos.

Uma correcta avaliação da vulnerabilidade e uma adequada classificação dos danos observados após a ocorrência de um sismo, podem não só contribuir para a execução de um correcto reforço sísmico melhorando o seu comportamento à acção sísmica, como também reduzir significativamente os custos de reabilitação destes edifícios.

2. INSPECÇÃO, REGISTO E AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE

No presente trabalho, a avaliação da vulnerabilidade e dos danos observados nas igrejas das ilhas dos Açores afectadas pelo sismo de 1998, tem como base a metodologia apresentada pelo GNDT (*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terramoti*). Esta metodologia identifica 28 mecanismos de dano associados ao comportamento dos diferentes macro-elementos que constituem a igreja (Figura 2:) perante a acção sísmica.

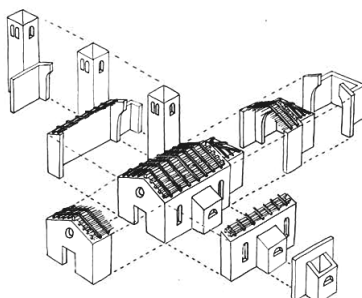


Figura 2: Principais macro-elementos que constituem a igreja [Doglioni *et al.*, 1994]

Durante a avaliação do registo fotográfico efectuada por Costa e Vasconcelos [1999] e dos respectivos relatórios de inspecção das igrejas do Faial e do Pico danificadas pelo sismo de 1998, foi observado que todas possuem coro alto e que, na sua maioria, apresentavam danos relacionados com o comportamento sísmico deste macro-elemento.

O coro alto é uma estrutura, normalmente em madeira, localizada à entrada da igreja, constituindo um segundo piso que por vezes dá acesso às torres sineiras. Este macro-elemento constitui um diafragma horizontal com uma determinada rigidez, dependente dos materiais que o constituem, tendo uma acção danificadora nas paredes laterais (ver Figura 3).



Figura 3: Danos resultantes da interacção entre coro alto e paredes laterais [Costa e Vasconcelos, 1999]

A importância do estudo deste macro-elemento é notória, devido aos danos que resultam da sua interacção com o resto da estrutura, como por exemplo, paredes laterais, arcarias que suportam esta estrutura ou mesmo interacção com a fachada.

A observação de vários danos associados a este macro-elemento nas igrejas estudadas, levou à introdução de um novo mecanismo de dano como se ilustra Figura 4.

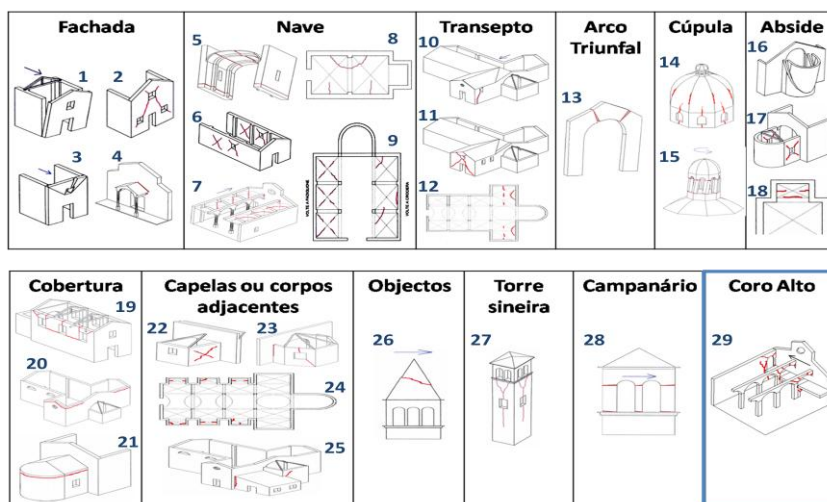


Figura 4: Mecanismos de dano (adaptado de Linee Guida, 2006)

2.1 - Ficha de levantamento de dano e avaliação da vulnerabilidade das igrejas

Para aplicar a metodologia desenvolvida pelo GNDT às igrejas do Faial e do Pico, foi elaborada uma ficha de levantamento de danos e avaliação da vulnerabilidade sísmica, tendo como base a apresentada pelo *Ministero dei Beni Culturali e dei Lavori Pubblici* (2003).

A ficha está dividida em três partes distintas. A primeira parte é dedicada ao conhecimento geral da estrutura, contendo informações tais como identificação da igreja, sua localização, dados históricos sobre 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 importantes 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 (ver secção **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). A terceira parte corresponde ao cálculo do índice de dano (i_d), índice de vulnerabilidade (i_v) e índice de segurança (I_s), de acordo com o LV1 (*Livello di valutazione* 1) do documento *Linee Guida* (2006). Estas expressões foram adaptadas devido à introdução do novo mecanismo.

Na segunda parte da ficha de levantamento, são registados todos os mecanismos de dano observados e feita uma avaliação quanto à sua gravidade. Cada dano é classificado numa escala de 0 a 5 (parâmetro d_k), sendo “0” relativo à ausência de dano e “5” correspondente ao colapso do elemento de acordo com a Escala Macrossísmica Europeia (EMS 98) (Grünthal, 1998). O modo de dano está previamente definido para a maior parte dos mecanismos caracterizando, de acordo com C.N.R. (2002), o modo de dano que poderá ser do tipo I, correspondente comportamento das paredes para fora do plano, ou do tipo II no qual a resposta das paredes é no próprio plano (tipicamente por corte e flexão). O coeficiente ρ_k é o indicador da influência do dano no edifício para cada um dos mecanismos de dano. Em alguns mecanismos de dano, este valor pode ser assumido entre 0,5 e 1 consoante a sua relevância na estrutura em estudo, sendo atribuído o valor 1 quando o elemento é considerado de elevada importância e 0,5 quando pouco importante. Em relação à avaliação da vulnerabilidade (i_v), podemos observar pela **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** que existem dois parâmetros a classificar: i) (v_{kp}) que representa as soluções tecnológicas ou construtivas que podem atenuar o aparecimento do mecanismo em questão; ii) (v_{ki}) a lista de situações ou fragilidades construtivas que possam favorecer a activação do mecanismo de dano em avaliação. Estes parâmetros são classificados de 0-3, quanto à sua eficácia, ou relevância no aparecimento do mecanismo de acordo com o manual de preenchimento desenvolvido pelo C.N.R. (2002).

Tendo por base o manual de preenchimento original do C.N.R. (2002) para os 28 mecanismos de dano, foram definidas algumas regras de classificação dos parâmetros v_{kp} e v_{ki} 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 acção sísmica.

Na Figura 5 é apresentado o gráfico que contabiliza os mecanismos que mais vezes foram observados nos dezasseis casos de estudo.

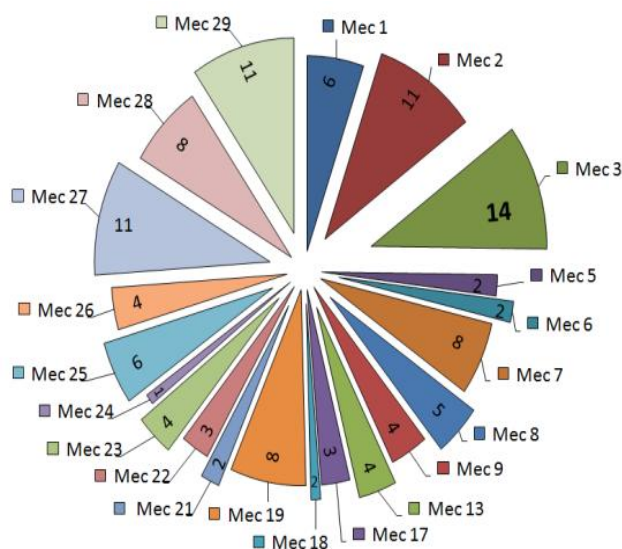


Figura 5: Estatística dos danos observados nas 16 igrejas dos Açores após a ocorrência do sismo de 9 de Junho de 1998

2.1.1 - Cálculo do índice de dano, índice de vulnerabilidade e índice de segurança

Concluída a identificação e classificação da igreja quanto aos danos observados e à vulnerabilidade associada a cada macro-elemento, a terceira parte da ficha de levantamento foi elaborada com o objectivo de calcular o índice de dano (i_d), índice de vulnerabilidade (i_v) e índice de segurança (I_s) automaticamente utilizando as expressões apresentadas na *Linee Guida* [2006]. Como já referido anteriormente, estas expressões foram adaptadas de modo a considerar a introdução do novo mecanismo.

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

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

De salientar que o valor do índice de dano (i_d) 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.

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

em que: v_{ki} corresponde à lista de limitações ou defeitos construtivos que possam favorecer a activação do mecanismo de dano; e, v_{kp} as soluções tecnológicas ou disposições construtivas que podem minimizar o aparecimento do mecanismo.

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

onde: γ_1 representa o factor de importância da igreja; S e a_{gR} são respectivamente o parâmetro que corresponde ao factor amplificador do solo e aceleração de referência em m/s^2 de acordo com o Eurocódigo 8 (CEN, 2004) para a zona sísmica em análise; a_{ELU} corresponde à aceleração do solo em relação ao estado limite último e é dado pela expressão:

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

Na Figura 6 é apresentado o gráfico com os valores dos três índices avaliados.

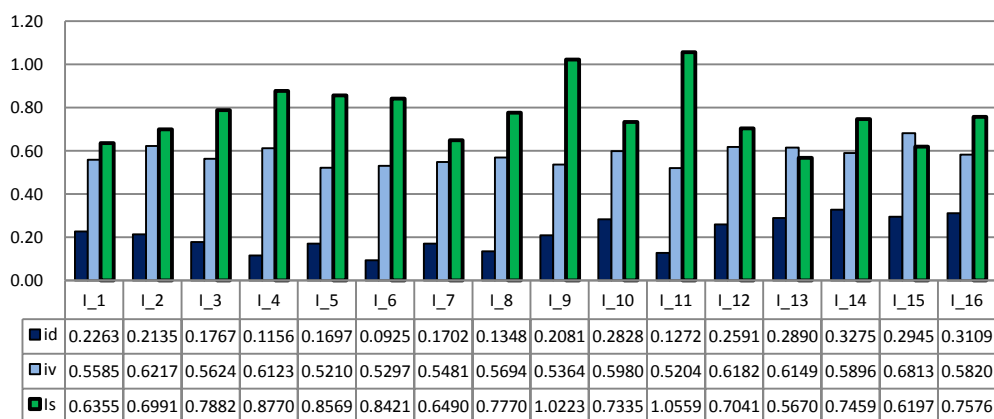


Figura 6: Valores de i_d , i_v e I_s obtidos para as 16 igrejas estudadas

Relativamente ao índice de dano (i_d) podemos observar que, na maior parte das igrejas, este valor é baixo, sendo apenas igual ou superior a 0,3 em dois dos casos de estudo. Como foi referido anteriormente, de acordo com o documento original considera-se que igrejas com este valor de índice de dano não reúnem as condições necessárias à sua utilização.

O comportamento sísmico de todo o edifício é representado com base estatística pelo índice de vulnerabilidade (i_v) (variável entre 0 e 1), sendo este uma média ponderada do comportamento das diferentes partes da igreja [Linee Guida, 2006]. Pela análise do gráfico da Figura 6, observa-se que todas as igrejas apresentam um índice de vulnerabilidade (i_v) elevado compreendido entre 0,5 e 0,7.

Quanto ao índice de segurança (I_s), nota-se que a maior parte dos casos de estudo apresentava valores inferiores à unidade, o que significa que as igrejas em questão não estariam em condições de suportar um sismo com a aceleração de referência (a_{gR}) considerada ($2,5 \text{ m/s}^2$) (NA, 2008).

De salientar que os resultados obtidos para o índice de segurança (I_s) dizem respeito à aceleração de referência (a_{gR}) correspondente a esta região, e dependem também dos valores admitidos para o factor amplificador do solo ($S=1$) e factor de importância ($\gamma_1 = 0,80$).

3. MODELO MECÂNICO APLICADO A CAMPANÁRIOS

De acordo com o documento *Linee Guida* [2006], o comportamento sísmico de macro-elementos como torres, campanários e outras estruturas altas e esbeltas, depende de alguns factores específicos tais como: a esbelteza da estrutura, o grau de amortecimento das paredes, a eventual presença de estruturas adjacentes mais baixas ou a presença de elementos arquitectónicos esbeltos no topo (pináculos, campanário, etc.).

É bastante frequente o caso em que as torres sineiras se encontram em contacto com a estrutura principal da igreja, podendo criar limitações horizontais que alteram a resposta do macro-elemento à acção sísmica. Em todos os casos de estudo, e na maior parte das igrejas açorianas, encontramos apenas torres sineiras agrupadas ou incorporadas na própria estrutura da igreja.

Tal como é referido no documento italiano *Linee Guida* (2006), a presença deste tipo de interacção horizontal a diferentes alturas, pode mudar profundamente o comportamento e a resposta da estrutura à acção sísmica.

Nas torres sineiras, o campanário pode ser um elemento particularmente vulnerável à rotura ao corte por escorregamento, devido à existência de grandes aberturas (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), normalmente constituídas por colunas bastante esbeltas e pouco carregadas.

3.1- Descrição do método

Segundo o documento *Linee Guida* (2006), os mecanismos de dano e colapso desta tipologia de estruturas dependem de parâmetros como a geometria e características construtivas.

Para uma avaliação quantitativa com modelos mecânicos simplificados, é no entanto 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 que pode causar, numa secção genérica, o esmagamento em zona de compressão, após fendilhação provocado pela não resistência à tracção da alvenaria.

A verificação da flexão composta de uma estrutura esbelta em alvenaria de pedra é efectuada relacionando o momento actuante de cálculo com o momento último resistente calculado, assumindo que a alvenaria não tem resistência à tracção e que é necessário considerar uma distribuição não-linear da compressão (*Linee Guida*, 2006).

O documento de referência, permite-nos ainda o cálculo do valor da aceleração do solo correspondente ao estado limite último ($a_{ELU,i}$), que deverá ser comparado com a aceleração de referência ($a_{g,R}$) da zona sísmica em questão, completando assim a verificação da segurança da estrutura.

3.2 - Aplicação do modelo mecânico simplificado a dois campanários da ilha do Pico

A metodologia anteriormente apresentada foi aplicada a torres de duas das igrejas da ilha do Pico afectadas pelo sismo de 1998: 1) Igreja de Sta. Maria Madalena na Madalena; 2) N. S. da Boa Nova em Bandeiras.

Na igreja de Bandeiras as torres são agregadas ao corpo principal da igreja, ao contrário da igreja da Madalena que possui torres incorporadas. No entanto, tal como referido anteriormente, a aplicação do modelo mecânico simplificado é idêntico em ambos os casos, pois apenas é analisada a parte da livre da torre que corresponde, quer na igreja de Bandeiras que na da Madalena, à zona do campanário (Figura 7 e Figura 8).

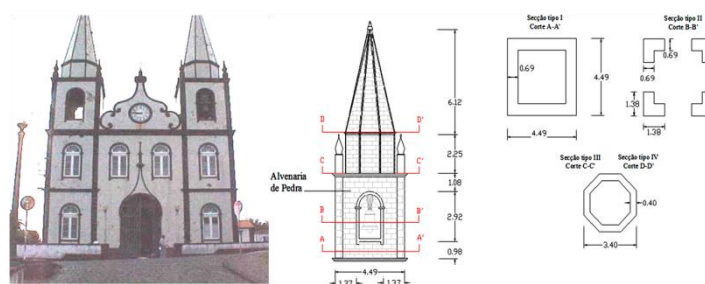


Figura 7: Igreja e campanário da Madalena – Pico

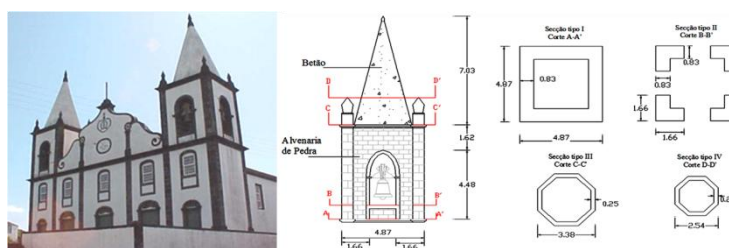


Figura 8: Igreja e campanário de Bandeiras – Pico

Em ambos os casos de estudo verificou-se que a secção crítica corresponde à base das colunas da zona do campanário, facilmente explicável não só pelas reduzidas dimensões em planta dos elementos como também ao reduzido esforço axial a esse nível. Comparando o momento resistente (M_u) com o momento correspondente à aceleração de referência M_{res} , nas secções críticas (Tabela 1), verifica-se que ambos satisfazem a primeira condição ($M_{res} > M_u$). No entanto, os resultados obtidos para a aceleração crítica do solo correspondente ao estado limite último (a_{ELU}) são inferiores à aceleração de referência da zona sísmica estudada ($a_{gR} = 2,5m/s^2$), evidenciando a sua elevada vulnerabilidade.

Tabela 1: Valores obtidos para as secções críticas dos campanários das igrejas da Madalena e Bandeiras

Campanário	Altura (m)	Cota da secção crítica (m)	Dimensão das colunas (m)	Período, T (s)	M_{res} ($kN \cdot m$)	M_u ($kN \cdot m$)	a_{ELU} (m/s^2)
Madalena	7.12	0.95	0.38 x 0.38	0.2179	552.74	41.67	0.886
Bandeiras	7.83	1.01	0.66 x 0.66	0.2345	894.92	57.59	1.201

É importante salientar que não foi admitida a cota real a que se encontra o campanário. Por esta razão, foram calculados os valores da aceleração crítica do solo para o caso de admitirmos este campanário no topo de uma

torre isolada, ou seja, assumindo que a torre sineira não está em contacto com o resto da estrutura da igreja. Com esta comparação pretende-se compreender até que ponto a cota a que se encontra o campanário influencia a avaliação da sua vulnerabilidade.

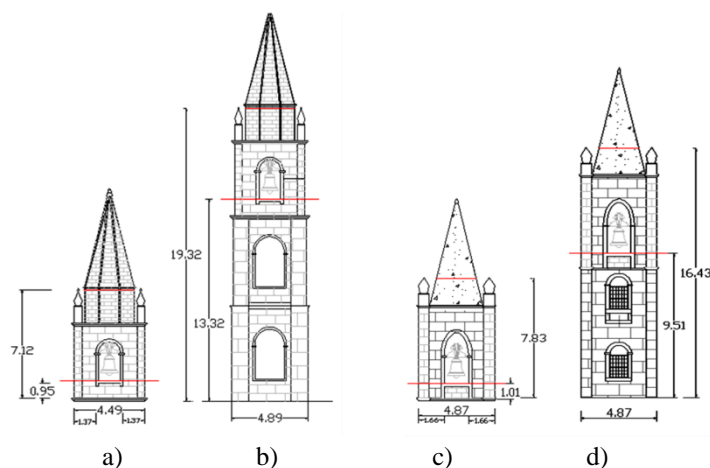


Figura 9: Secções críticas nas duas situações consideradas: a) Igreja da Madalena apenas considerando o campanário; b) Igreja da Madalena considerando a torre isolada; c) Igreja de Bandeiras apenas considerando o campanário; d) Igreja de Bandeiras considerando a torre isolada.

Tabela 2. Características das estruturas estudadas e aceleração do solo correspondente ao colapso (a_{ELU}) da secção crítica

	Campanário Madalena (a)	Torre isolada Madalena (b)	Campanário Bandeiras (c)	Torre isolada Bandeiras (d)
Altura Total (m)	7.12	19.32	7.83	16.43
Cota da secção crítica (m)	0.95	13.32	1.01	9.51
Peso (kN)	973	4143	1239	3258
T (s)	0.2179	0.4620	0.2345	0.4086
M_{res} (kN · m)	552.74	411.46	894.92	650.97
M_u (kN · m)	41.67	260.46	57.59	240.16
a_{ELU} (m/s ²)	0.886	0.844	1.201	0.895

Os valores da aceleração crítica do solo apresentados na Tabela 2, demonstram a elevada vulnerabilidade dos campanários e que, em ambos os casos de estudo, a aceleração correspondente ao colapso da secção crítica diminui quando se considera a cota real a que se encontra o campanário. Este aumento da vulnerabilidade é causado pela amplificação da aceleração do solo ao nível do campanário.

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, e ao facto do seu período fundamental ser mais baixo, sendo neste caso o espectro de resposta mais penalizante.

4. CONCLUSÕES

Esta dissertação tinha como principal objectivo avaliar a vulnerabilidade sísmica do património religioso das ilhas do Faial e do Pico. Este trabalho foi também desenvolvido com o intuito de apresentar métodos de inspecção e registo, imprescindíveis para apoiar estratégias de intervenção futuras, otimizando este processo quer em situação pós-sismo como no reforço com vista à mitigação do risco sísmico deste património.

A sintetização de toda esta informação na base de dados, permite não só uma percepção do estado de dano e segurança sísmica das igrejas, como também apoiar a estimativa de custos de intervenção.

A aplicação de modelos mecanicistas simplificados fornece indicações úteis e fiáveis acerca da vulnerabilidade de macro-elementos como os campanários e torres sineiras, permitindo: i) determinar com rigor a secção crítica de elementos como campanários e torres sineiras; ii) calcular, embora aproximadamente, o valor da aceleração do solo correspondente ao colapso por flexão composta na secção mais vulnerável destes elementos.

5. REFERÊNCIAS

- Linee Guida (2006) Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni (elaborate in concerto dal Dipartimento della Protezione Civile e dal Ministero per i Beni e Attività Culturali, con il parere favorevole del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici), 21 luglio 2006
- Lagomarsino, S. (2006). On the vulnerability assessment of monumental buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Springer, 25 August 2006.
- Roque, J. C. A. (2002). Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria. Tese de Mestrado da Universidade do Minho.
- Nunes, J; França, Z.; Oliveira, C. and Ortiz, R. (1998). Seismic intensities distribution on the Pico island for the 9 of July, 1998 earthquake: morphological, geological and tectonical conditions. *APMG First Symposium on Meteorology and Geophysics, Lagos, Portugal*.
- Dogliani F., Moretti A., Petrini V., (1994). *Le chiese e il terremoto*. Lint, Trieste
- Costa, A. e Vasconcelos, O. (1999). Relatório de Inspeção das igrejas do Faial e do Pico, Açores
- Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998 – EMS-98 – Luxembourg 1998
- C.N.R. D.A.S.T. U.O.I.G. - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Dipartimento Attività Scientifiche e Tecnologiche, Unità Operativa Ingegneristico e Geologica - L'Aquila. "Studio per la vulnerabilità sismica degli edifici pubblici, strategici e di culto nei Comuni colpiti dal sisma del 31 ottobre 2002 - Decreto del Commissario delegato n.29 del 6.8.03" - allegato c3 metodologia per la valutazione del danno e della vulnerabilità e manuale della scheda chiese di ii livello.
- NP EN 1998-1. Anexo Nacional EC8 - Versão Final 17 de Fevereiro de 2008