

# Reabilitação de construções antigas – Casos práticos

Paulo B. Lourenço<sup>1</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

## RESUMO

A análise e o reforço de construções antigas são tarefas difíceis devido à sua complexidade geométrica intrínseca, à heterogeneidade e variabilidade das propriedades dos materiais tradicionais, ao escasso conhecimento sobre as técnicas construtivas originais, à difícil caracterização das acções e à quase inexistência de normas ou instruções específicas que salvaguardem os técnicos responsáveis. Nesta comunicação apresentam-se exemplos de estudos para a intervenção em construções antigas, recorrendo a técnicas de inspecção e análise adequadas.

## 1. INTRODUÇÃO

A conservação e restauro de monumentos e zonas históricas urbanas ou rurais são disciplinas que exigem uma formação específica. O rápido desenvolvimento dos materiais e técnicas de construção, que se afastaram da prática tradicional, e as descobertas científicas, que colocam novos métodos à disposição de todos aqueles envolvidos na defesa do património, são aspectos decisivos na divisão entre a arte da construção e a ciência da conservação e restauro. Estes aspectos introduzem na conservação do património uma dimensão e carácter próprios, sendo extraordinariamente difícil respeitar o património sem formação e conhecimento específicos. O conhecimento e formação cobrem uma variedade muito abrangente de áreas, muitas das quais não estão incluídas na formação tradicional oferecida a engenheiros civis e arquitectos, os profissionais usualmente mais envolvidos na conservação do património. Estas áreas incluem a arqueologia, a história da arquitectura e do urbanismo, o planeamento urbano, a forma estrutural da arquitectura e a utilização dos materiais tradicionais, o estudo dos seus mecanismos de deterioração e os métodos de consolidação ou substituição, e, finalmente, a história da filosofia e ética da conservação.

A qualidade de uma intervenção assenta na integração dos conceitos descritos pelo coordenador da intervenção, que deverá possuir qualificações generalistas nas áreas descritas e a capacidade para se rodear de especialistas adequados nos casos em que tal for necessário. Após a realização dos trabalhos e a decisão da intervenção apropriada ao caso em estudo, resulta essencial o planeamento adequado da intervenção que, necessariamente, se irá reflectir sobre o projecto e sobre as condições técnicas do caderno de encargos. A qualidade destes

---

<sup>1</sup> Professor Associado

dois elementos baliza de imediato a qualidade da intervenção, sendo, infelizmente, corrente que os problemas de execução sejam resolvidos em obra, por indivíduos com preparação técnica menos adequada.

A ideia que as construções que sobreviveram durante séculos sem danos ou com danos menores já demonstraram a sua segurança parece receber uma aceitação generalizada. No entanto, existem inúmeras situações em que este raciocínio é inválido porque a capacidade resistente da construção pode-se reduzir ao longo do tempo por diversas razões, entre as quais se salientam:

- A deterioração natural dos materiais;
- Os danos sucessivos introduzidos por sismos anteriores, movimentos das fundações e acções de carácter repetitivo como o vento e as variações de temperatura;
- As modificações na estrutura e materiais de construção tais como a adição de novos corpos nos conjuntos monumentais, a ampliação de corpos existentes em planta e altura, a ligação de construções anteriormente independentes e a substituição de coberturas leves em madeira por coberturas com peso elevado.

Adicionalmente, é um facto bem conhecido que os sistemas estruturais do património arquitectónico se foram desenvolvendo, ao longo dos tempos, tendo em vista soluções cada vez mais eficientes para resistir à acção do peso da estrutura, mediante um processo de aprendizagem baseado essencialmente nas lições dos erros anteriores. Esta aprendizagem não ocorreu necessariamente no que respeita às acções eventuais e à segurança sísmica. Em países onde a ocorrência de sismos é frequente, como no Japão, as lições fornecidas pelos danos dos sismos traduzem-se directamente em modificações da prática construtiva, que incorpora aspectos dirigidos a aumentar a resistência a estes eventos. Nos casos em que a existência de sismos destrutivos é esporádica, a modificação da prática construtiva é menos evidente ou duradoura. Este é o caso de Portugal continental, em que os sismos fortes ocorrem cada dois séculos ou mais, e no intervalo entre estes grandes acontecimentos raras vezes acontecem sismos significativos. Em particular, a lição do terramoto de 1755 e a técnica construtiva anti-sísmica que se seguiu (construção pombalina) foram quase completamente esquecidos antes de volvido um século sobre este desastre.

A análise e o reforço de estruturas antigas representam, efectivamente, grandes desafios devido à sua complexidade geométrica intrínseca, à heterogeneidade e variabilidade das propriedades dos materiais tradicionais, ao escasso conhecimento sobre as técnicas construtivas originais, à difícil caracterização das acções e à quase inexistência de normas ou instruções específicas que salvaguardem os técnicos responsáveis. Adicionalmente, as restrições à inspecção e remoção de amostras em edifícios de elevado valor histórico, bem como, os custos elevados das tarefas de inspecção e diagnóstico, conduzem frequentemente a informação muito reduzida sobre a composição construtiva interna dos elementos estruturais e sobre as propriedades dos materiais existentes.

Apesar disso, nos últimos anos têm-se verificado investimentos consideráveis nesta área, os quais têm resultado num desenvolvimento técnico-científico notável no âmbito da inspecção, das técnicas de ensaios não-destrutivos, da monitorização e da análise estrutural. O estudo das construções históricas deve ser desenvolvido com base na utilização adequada das modernas tecnologias, sendo o especialista responsável por escolher e gerir os meios técnicos e financeiros disponíveis para alcançar os elementos necessários e suficientes para o conhecimento sobre a construção, o seu comportamento estrutural e as suas necessidades reais de reparação.

Neste artigo apresentam-se alguns estudos sobre o património arquitectónico que demonstram algumas das possibilidades dos meios actuais de análise.

## 2. IGREJA DE SANTO CRISTO EM OUTEIRO

A Igreja de Santo Cristo em Outeiro (Bragança) foi construída em 1698-1738. A estrutura é realizada essencialmente com xisto argamassado, ainda que seja visível cantaria de pedra granítica na fachada principal, ver Lourenço et al. (1999) para um relatório completo. A estrutura é de dimensões moderadas ( $38 \times 22 \text{ m}^2$  em planta, 13 m de altura da nave e 22 m de altura para as torres), ver Figura 1. A fachada é uma obra de grande valor arquitectónico devido ao arco geminado e ao revestimento granítico, possuindo um óculo de grandes dimensões e uma balaustrada entre as duas torres. Lateralmente, existem galilés cruzadas que formam três capelas. O interior da igreja possui uma única nave em cruz latina com abóbadas cruzadas, dividida em três partes por dois arcos diafragma. Os arcos são suportados pelas paredes laterais e pelos arcos transversais das capelas, que funcionam como contrafortes.

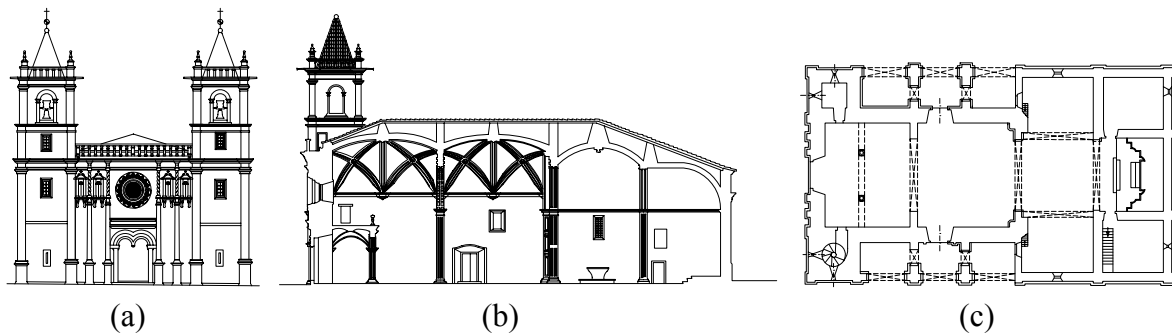


Figura 1 – Geometria da igreja, (a) alçado, (b) corte longitudinal e (c) planta

A igreja possui danos significativos na fachada central (arco geminado, óculo e balaustrada), com deslocamentos verticais e horizontais na direcção normal ao plano médio da fachada, associados a fendilhação visível. O coro possui deslocamentos horizontais e verticais significativos, com uma inclinação dos pilares de cerca de 3% e fendas pronunciadas nos arcos e nervuras pertencentes às abóbadas de cruzaria, como pode ser observado na Figura 2.

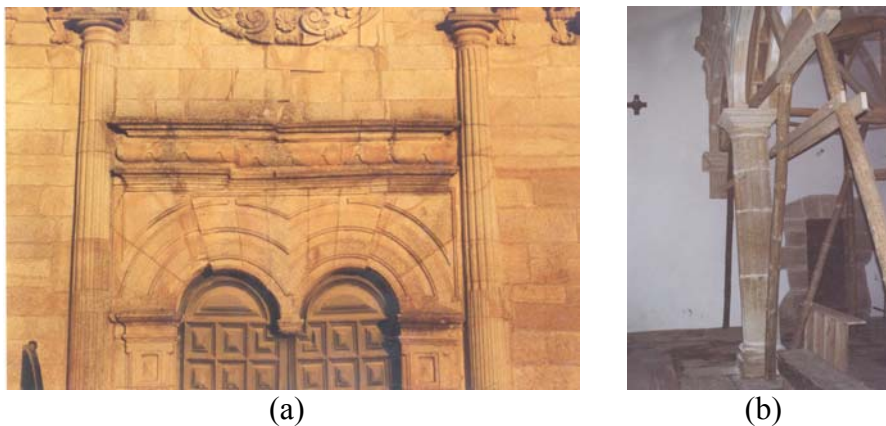


Figura 2 – Aspectos do (a) descaimento ao nível do arco geminado e (b) desvio em relação à vertical das colunas que suportam os arcos do coro

Efectuaram-se os seguintes trabalhos: (a) análise histórica do edifício, (b) sismologia histórica do local, (c) sondagem geotécnica, poços e ensaios de placa, (d) vectorização da fachada principal por fotogrametria monoscópica, (e) levantamento geométrico simplificado

do coro e fachada, (f) levantamento fotográfico e gráfico das patologias encontradas e (g) inspecção boroscópica da fachada principal.

Para justificar os danos apresentados pelo imóvel realizaram-se diferentes estudos. Com uma modelação plana da fachada / coro e interacção solo-estrutura, demonstrou-se que as acções verticais não seriam responsáveis pelos danos que o imóvel apresenta. Recorrendo à modelação tridimensional ilustrada na Figura 3, em que os diferentes panos (cantaria granítica com 0.30 m e xisto argamassado com 1.20 m de espessura) foram considerados, foi possível obter um afastamento máximo de cerca de 0.10 m no topo da parede, no caso da acção sísmica. Este valor é comparável com os valores medidos na estrutura. Da mesma forma, uma modelação tridimensional do coro, permitiu justificar que o dano exibido tem origem sísmica.

O projecto de intervenção incluiu quatro peças desenhadas, nomeadamente ES-RE-001 – Localização e descrição dos trabalhos a realizar (esc. 1/100), ES-RE-002 – Recuperação da zona central da fachada (esc. 1/200, 1/100, 1/50,1/20,1/1), ES-RE-003 – Operação de empuxe do coro com macacos de tracção (esc. 1/50, 1/20, 1/5) e ES-RE-004 – Reforço do coro. Salienta-se desde já a necessidade de um desenho inicial que localize convenientemente a zona a intervir e descreva a totalidade dos trabalhos a realizar. Na Figura 4 ilustra-se o desenho ES-RE-002, salientando-se a adopção de escalas diferentes que permitem o detalhe adequado, a utilização de materiais com a durabilidade adequada (como o aço inox), os pormenores do grampeamento da fachada e os pormenores da montagem do arco geminado.

As Condições Técnicas incluem as condições técnicas gerais, a recuperação da zona central da fachada, o empuxe do coro e a recuperação do coro. Para cada capítulo definiu-se o objecto, os critérios de medição, as características dos materiais, as características do equipamento e a tecnologia de execução. O detalhe do texto, associado ao efectivo planeamento dos trabalhos, limita o improvisado e as alterações da empresa de construção, assegurando a adequada realização dos trabalhos e permitindo a sua efectiva fiscalização.

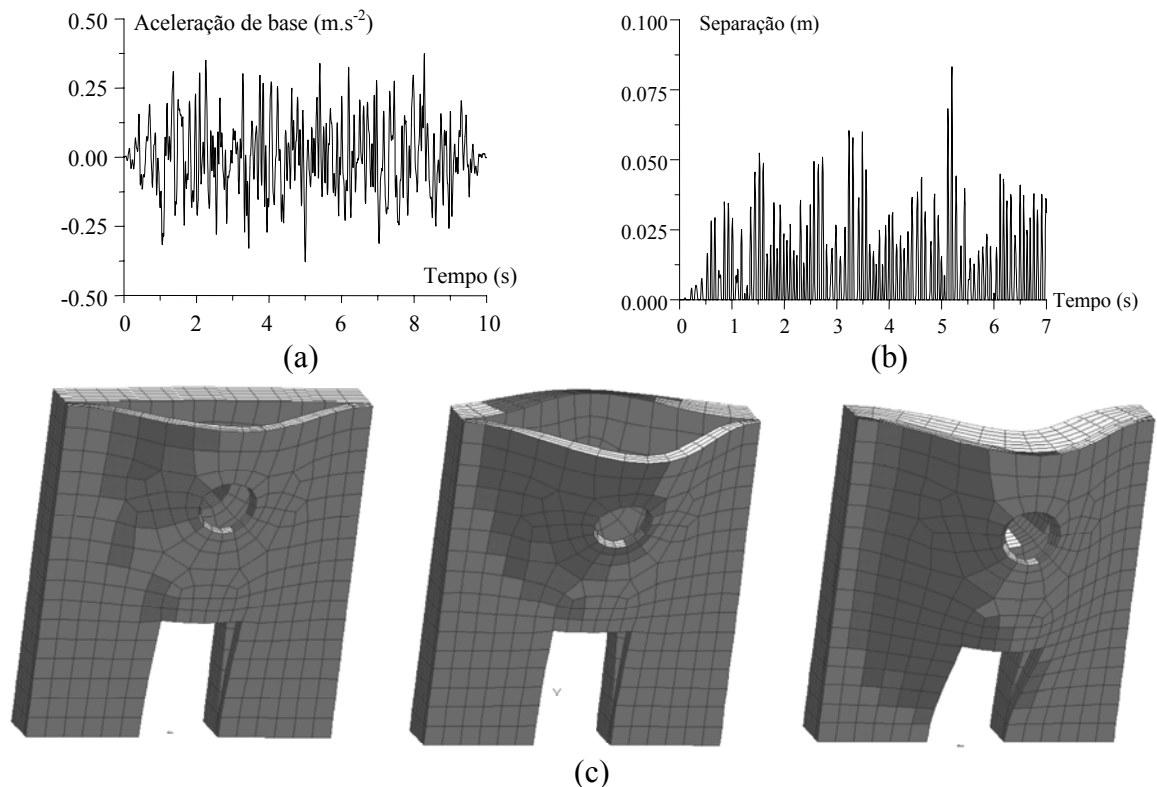


Figura 3 – Análise dinâmica da fachada: (a) acelerograma artificial; (b) deslocamento relativo dos dois panos de parede; (c) imagens da separação em diferentes instantes

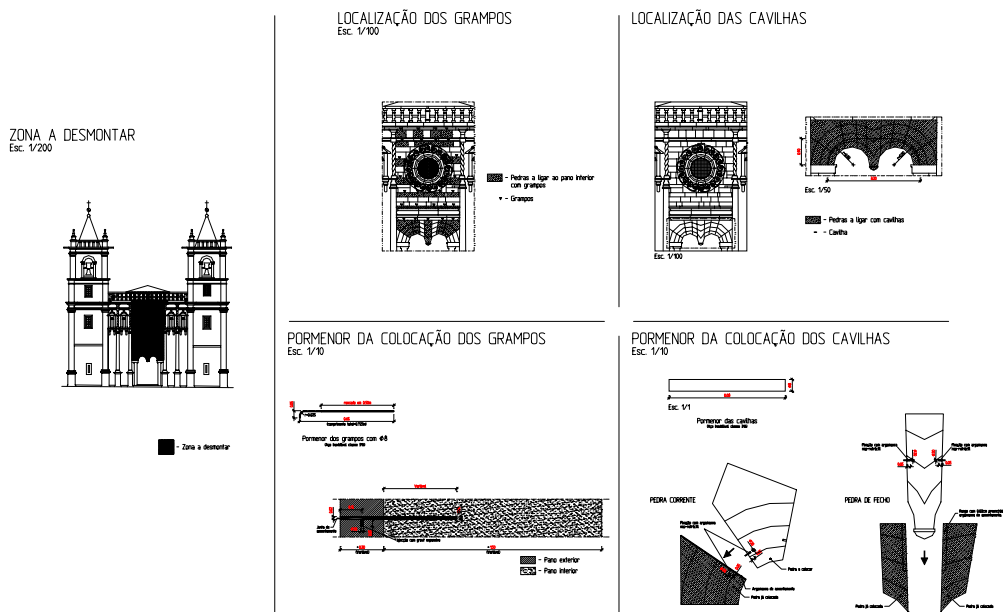


Figura 4 – Desenho ES-RE-002 – Recuperação da zona central da fachada

### 3. SANTUÁRIO DE SÃO TORCATO

O Santuário de S. Torcato situa-se no vale central da freguesia, desenvolvendo-se à sua volta todo o edificado da povoação. O templo de estilo híbrido, com elementos clássicos, góticos, renascentista e românticos, é todo construído em cantaria de pedra de granito da região. O gosto eclético, surge dentro do contexto da época, com predomínio de elementos decorativos neo-românicos. As suas dimensões, na globalidade, são consideráveis: nave central com  $57.5 \times 17.5 \text{ m}^2$  e com uma altura até aos telhados de 26.5 m; transepto com  $37.1 \times 11.4 \text{ m}^2$ ; e torres sineiras com  $7.5 \times 6.3 \text{ m}^2$  e aproximadamente 50.0 m de altura, ver Figura 5. A fachada simétrica é constituída por duas torres esbeltas e um corpo central. Em planta, o templo tem a forma típica da cruz latina. A nave central é constituída por abóbadas de arco perfeito, que se são apoiadas nas paredes laterais e em arcos transversais que, por sua vez, descarregam para as colunas laterais.

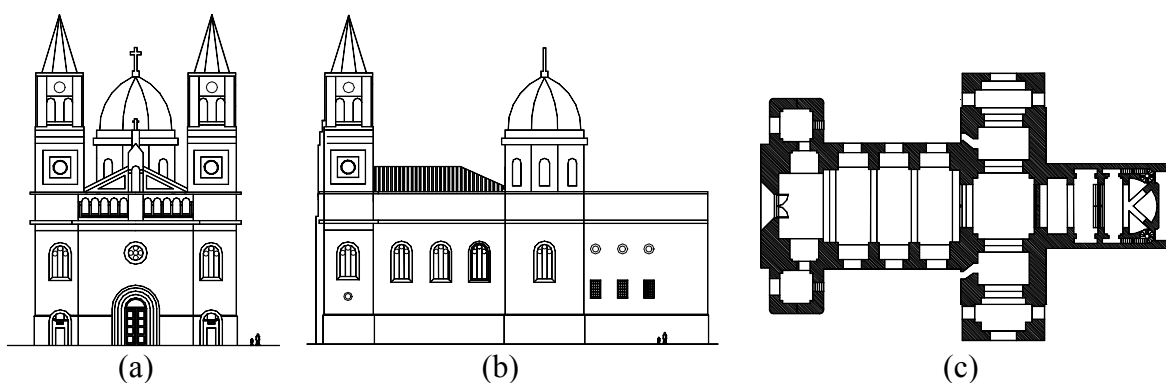


Figura 5 – Peças desenhadas: (a) fachada, (b) alçado lateral direito e (c) planta

Em 1871, foi iniciada a parte esquerda do transepto até à altura das portas, seguindo-se as paredes laterais e torres até ao nível das portas interiores das mesmas. Mais tarde, em 1910,

a nave do templo encontrava-se praticamente acabada, faltando ainda levantar as torres sineiras e completar o transepto, o que viria a ocorrer nas décadas de 50 e 60, ver Figura 6. A construção do Templo esteve parada mais de 50 anos. As obras foram retomadas em 1982, encontrando-se em construção a cobertura da capela-mor, que se erguerá 18 m acima do nível do telhado do Templo, prevendo-se também a construção de uma cúpula sobre o altar principal, constituída por gomos pré-fabricados de betão armado.

Desta forma, a construção, iniciada em 1868, atravessou todo o século XX e vai prosseguir para o novo século. Com mais de século de existência, a estrutura do templo apresenta um número considerável de anomalias, ver Lourenço e Ramos (1999).

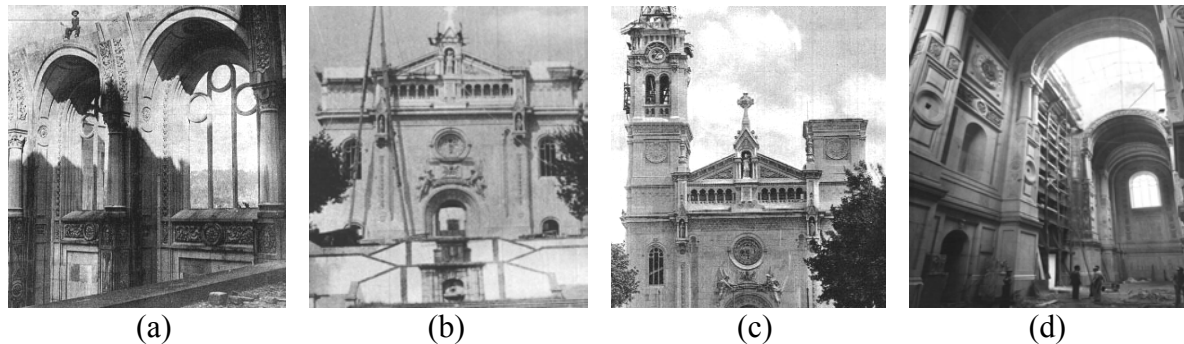


Figura 6 – Fases de construção: (a) pormenor dos pilares dos arcos da nave central, (b) acabamento do lintel da fachada e arranque de construção da primeira torre, (c) construção da segunda torre e (d) transepto inacabado

Para representar as características de resistência e de deformabilidade do solo de fundação procedeu-se à realização de uma prospecção geotécnica, Martins (1999), que incluiu trinta e um ensaios com penetrómetros dinâmicos pesados (PDP), quatro sondagens contínuas, através da introdução no terreno de tubos metálicos com cerca de 1 m de comprimento contendo no interior tubos plásticos para a recolha de amostras, e dois poços de reconhecimento, junto de cada torre. A combinação dos ensaios PDP e das sondagens contínuas permitiu representar os perfis geotécnicos do solo, Figura 7. Na proximidade das torres identificou-se a presença de camadas de aterro e solo vegetal, com valores muito baixos de resistência mecânica.

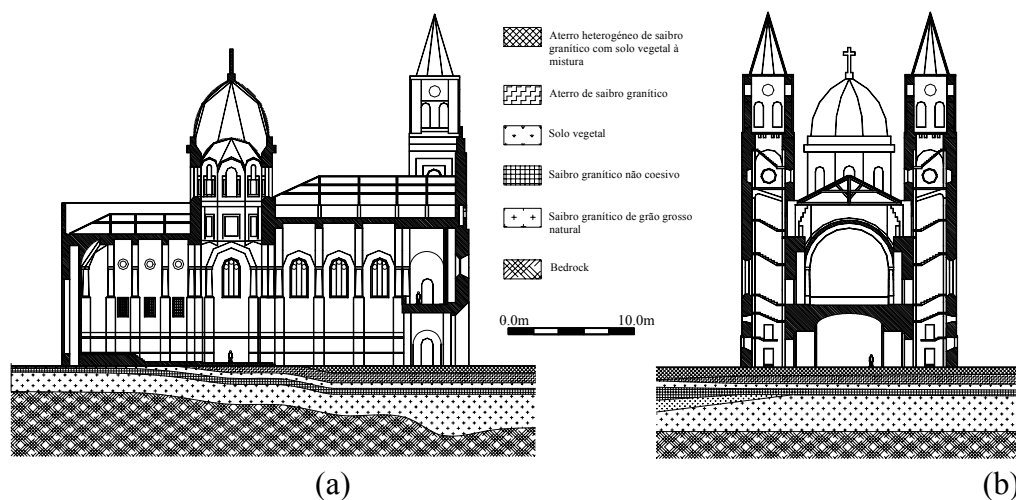


Figura 7 – Perfis geotécnicos: (a) longitudinal e (b) transversal sob as torres.

A estrutura apresenta uma série de fendas com dimensões significativas na fachada, coro e nos arcos das capelas. Não é possível saber a data do seu aparecimento, sendo razoável admitir que se trata de um fenómeno que tem ocorrido de forma diferida. As fendas foram todas registadas e classificadas em diversos desenhos. Na fachada principal pode-se observar uma grande fenda que, em alguns locais do seu desenvolvimento, atinge uma abertura superior a 50 mm. A fenda tem origem no arco da porta principal, desenvolvendo-se na vertical para a rosácea, continuando depois na direcção oblíqua e atravessando a galeria exterior. Dentro da galeria observa-se também um conjunto de cinco fendas, todas verticais, situadas da parte esquerda da mesma, com aberturas máximas. Recorrendo a um teodolito óptico foi possível medir os deslocamentos das torres sineiras e dos arcos da nave, verificando-se que ambas as torres têm deslocamentos transversais na mesma direcção, com inclinações da ordem dos  $10^{-4}$  rad. Os arcos da nave central apresentam todos eles deslocamentos consideráveis, apresentando um desnível, entre os pontos mais elevados de 0.20 m. Também se verifica que, ao nível da base esquerda dos arcos, existe um desnível de 0.10 m. Este desnível foi comprovado com um levantamento do pavimento da nave e transepto recorrendo a uma estação total, ver Figura 8.

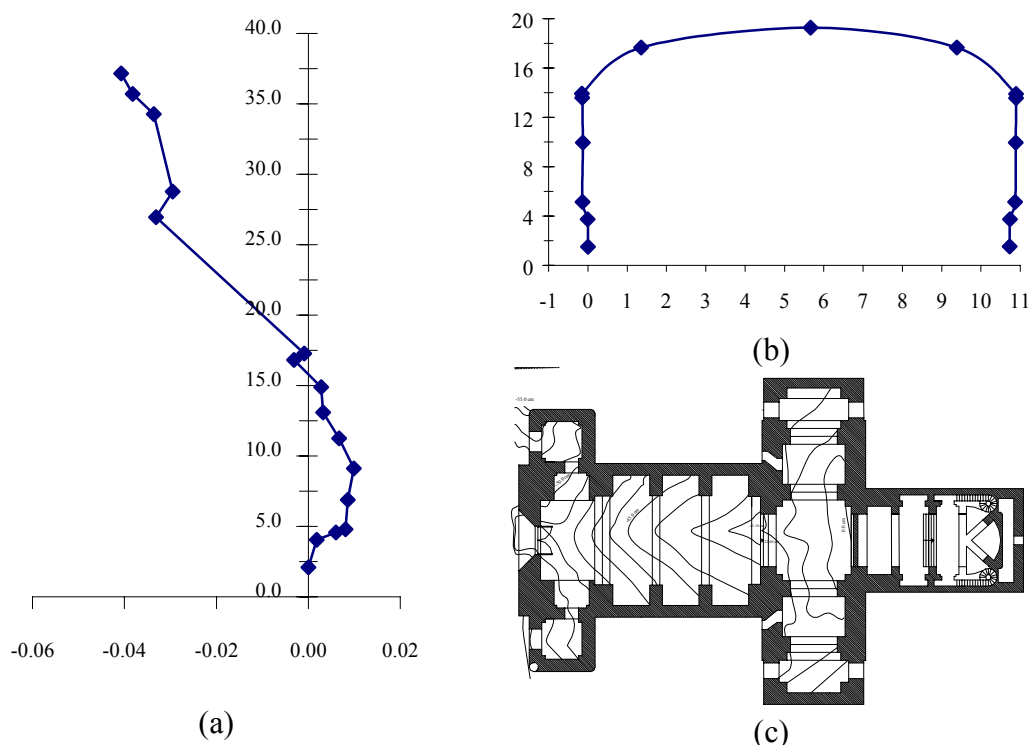


Figura 8 – Deslocamentos observados: (a) na torre sineira esquerda, (b) no 1º arco da nave principal e (c) ao nível do pavimento da nave central e transepto

Desde Maio de 1998 que a estrutura do santuário se encontra monitorizada. Inicialmente, foram colocados tentos de gesso para determinar as fendas activas, tendo sido seleccionadas catorze fendas activas, com abertura significativa e presentes em locais de acesso conveniente. Nestas fendas foi colada uma estação de leitura, formada por um conjunto de placas que, através de um medidor de fendas, permite determinar a variação da sua abertura na direcção normal e transversal. Para além da variação da dimensão da fenda, é ainda registada a temperatura da estrutura no local da fendas. As torres sineiras encontram-se monitorizadas através da aplicação de dois pêndulos, um em cada torre, ver Figura 9.

A monitorização efectuada da estrutura é insuficiente para permitir uma análise completa dos resultados mas parece ser razoável afirmar que os valores máximos de abertura de fendas encontrados são da ordem dos 0.1 mm/ano. Os valores medidos nos pêndulos parecem comprovar o afastamento das torres e o aumento da inclinação para o exterior.

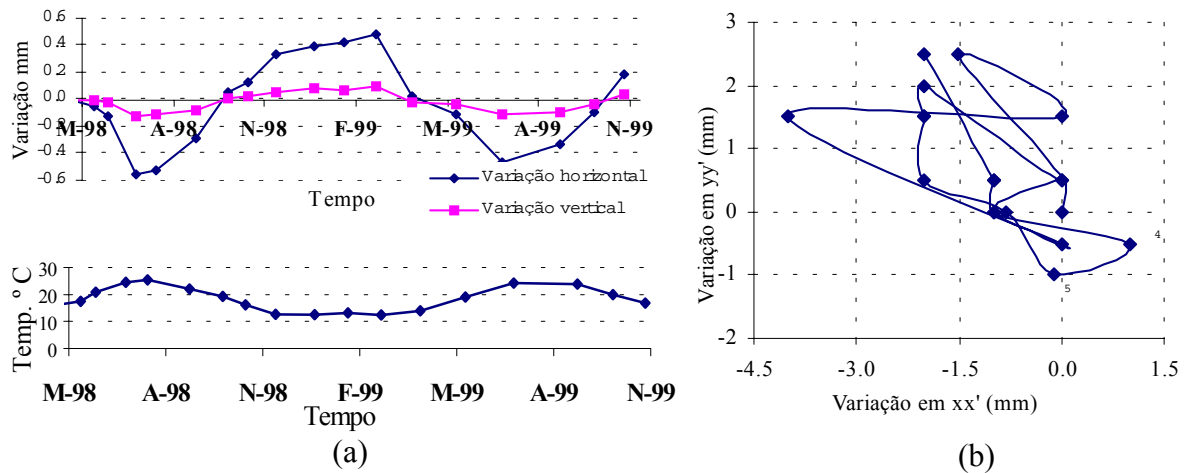


Figura 9 – Monitorização da estrutura: (a) deslocamentos e variação de temperatura num ponto de medição na fachada principal e (b) deslocamentos do pêndulo da torre direita

Tendo em vista a correcta análise e justificação das patologias apresentadas pela estrutura, recorreu-se a uma modelação tridimensional de toda a nave, tendo-se admitido comportamento não-linear dos materiais. A estrutura foi sujeita apenas a acções verticais (peso próprio da estrutura,), sendo considerada a interacção solo-estrutura.

Os resultados finais permitem concluir que: (a) a fendilhação prevista no modelo, ver Figura 10, está de acordo com a fendilhação observada na estrutura. Comprova-se a fendilhação generalizada da estrutura, ocorrendo as fendas mais importantes ao nível da abóbada e arcos da nave, bem como da fachada frontal. São ainda visíveis fendas ao nível das paredes laterais e da abóbada do coro; (b) os valores máximos das tensões principais mínimas (compressão) ocorrem ao nível dos arcos da nave, particularmente ao nível do 3º arco. O valor de 7.0 MPa obtido é razoavelmente elevado, sendo provável que exista risco de início de esmagamento deste arco; (c) verifica-se o princípio da formação de um mecanismo de colapso com duas “rótulas” (linhas de rotura) na abóbada da nave; (d) os assentamentos da estrutura são muito substanciais, atingindo um máximo de 0.19 m sob a torre direita, e aumentando gradualmente ao longo da nave, no sentido do transepto para as torres. A diferença entre a base do 1º arco (do lado das torres) e a base do 4º arco (do lado do transepto) é de 0.08 m. Este valor é próximo do valor obtido com recurso a meios topográficos; (e) em oposição ao verificado na estrutura, a fendilhação obtida no cálculo não ocorre ao nível da chave dos arcos. A razão para esta diferença não é clara, mas é possível que a fenda longitudinal da nave, se tenha iniciado imediatamente após a construção da nave, enquanto que os assentamentos seriam progressivos; (f) a análise indica que ambas as torres se encontram inclinadas para a esquerda da estrutura, sendo o efeito mais grave na torre esquerda ( $1.5 \times 10^{-3}$  rad) do que na torre direita ( $1.2 \times 10^{-3}$  rad). Estes valores são próximos dos medidos na estrutura.

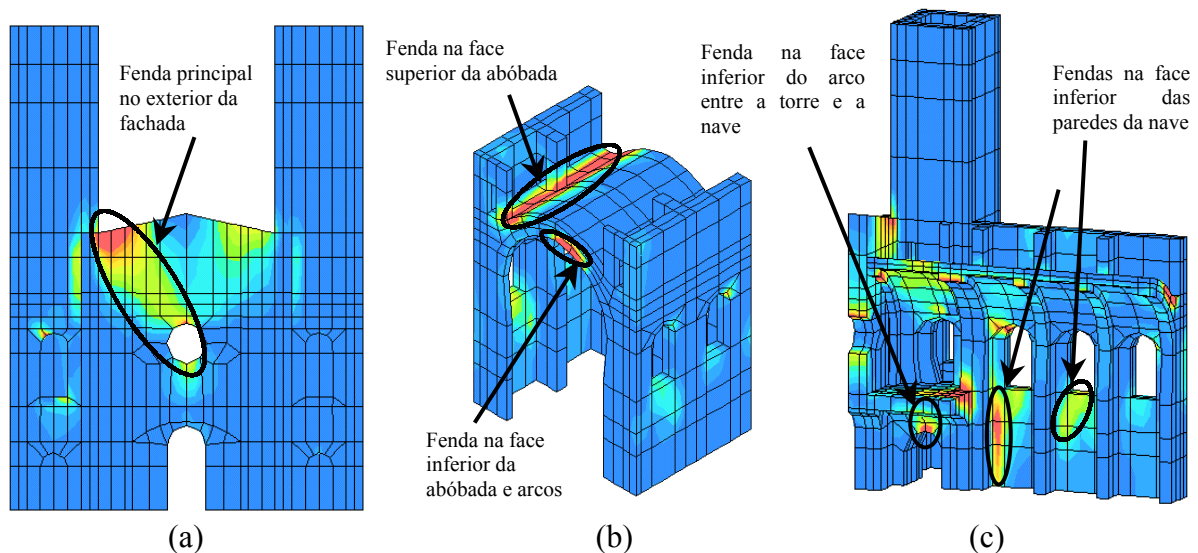


Figura 10 – Fendilhação obtida com a modelação não-linear: (a) fachada, (b) corte transversal nos arcos da nave principal e (c) corte longitudinal

#### 4. EXEMPLOS DE RISCO SÍSMICO

As construções históricas e, em particular, os monumentos em Portugal são geralmente em alvenaria de pedra, resultando em construções pesadas e muito rígidas. Isto resulta em forças e acelerações elevadas aquando da ocorrência de terremotos com possibilidade de danos consideráveis.

A Baixa Pombalina da Cidade de Lisboa, por ser constituída por solos sedimentares argilo-arenosos e por se situar junto à falha do Vale Inferior do Tejo, é área de elevado risco sísmico, devendo ser tomadas as medidas necessárias para atenuar os possíveis danos e prejuízos que um sismo pode provocar no edificado Pombalino. A Baixa Pombalina representa um conjunto arquitectónico e cultural de importância muito significativa que tem sofrido alterações sucessivas nos espaços interiores e nas estruturas das construções, sem modificações significativas nos aspectos arquitectónicos exteriores. Para um quarteirão tão significativo quanto o Quarteirão do Martinho da Arcada mais de 50% do sistema estrutural do quarteirão foi profundamente alterado e apenas cerca de 20% do sistema estrutural se encontra ainda na sua forma original, ver Ramos e Lourenço (2000)! Estes valores são por si só ilustrativos do estado de algum do património em Portugal.

As sucessivas intervenções na compartimentação dos edifícios e a introdução de materiais com características mecânicas radicalmente diferentes dos elementos originais, poderão enfraquecer os sistemas estruturais dos edifícios relativamente à acção dos sismos. Na Figura 11 ilustram-se os resultados obtidos recorrendo a uma simplificação do edifício-tipo pombalino com apenas dois pisos. Os resultados permitem comprovar o comportamento deficiente do edifício, em especial, no caso de um sismo perpendicular à direcção do frontal. Neste caso, obteve-se colapso do frontal para uma carga de cerca de 30% da acção sísmica regulamentar e colapso das paredes exteriores paralelas ao frontal para cerca de 80% da acção sísmica regulamentar. Em qualquer dos casos, a segurança não parece ser verificada. Na Figura 12 ilustram-se os resultados do estudo preliminar que contempla a totalidade do quarteirão. Verifica-se que as frequências de vibração são relativamente reduzidas, o que conduzirá a acelerações muito elevadas e danos previsíveis nas zonas mais deformadas da figura para terremotos com epicentro próximos de Lisboa.

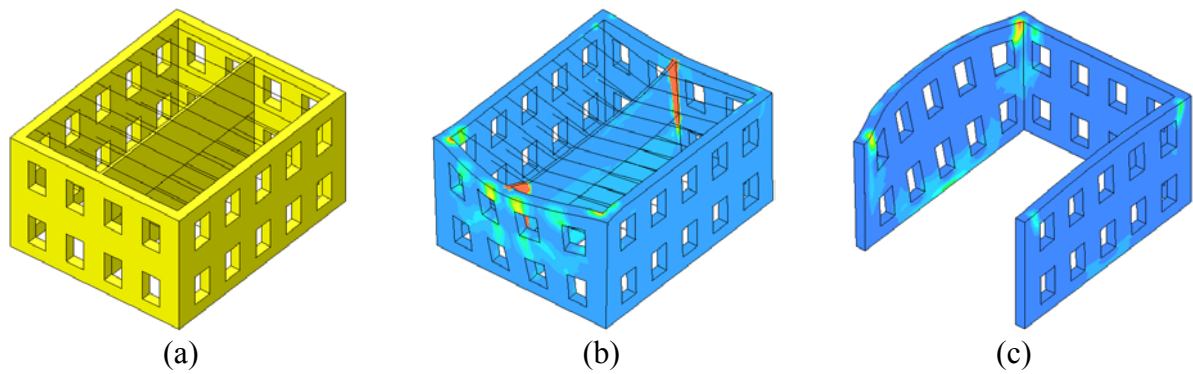


Figura 11 – Estudo de um edifício pombalino: (a) representação das paredes exteriores, frontal e soalho; (b) deformação e fendilhação provocada pela acção do sismo na direcção do frontal; (c) deformação e fendilhação provocada pela acção do sismo na direcção normal ao frontal. O azul escuro indica ausência de fendilhação, enquanto que as restantes cores indicam níveis de fendilhação (máximo a vermelho)

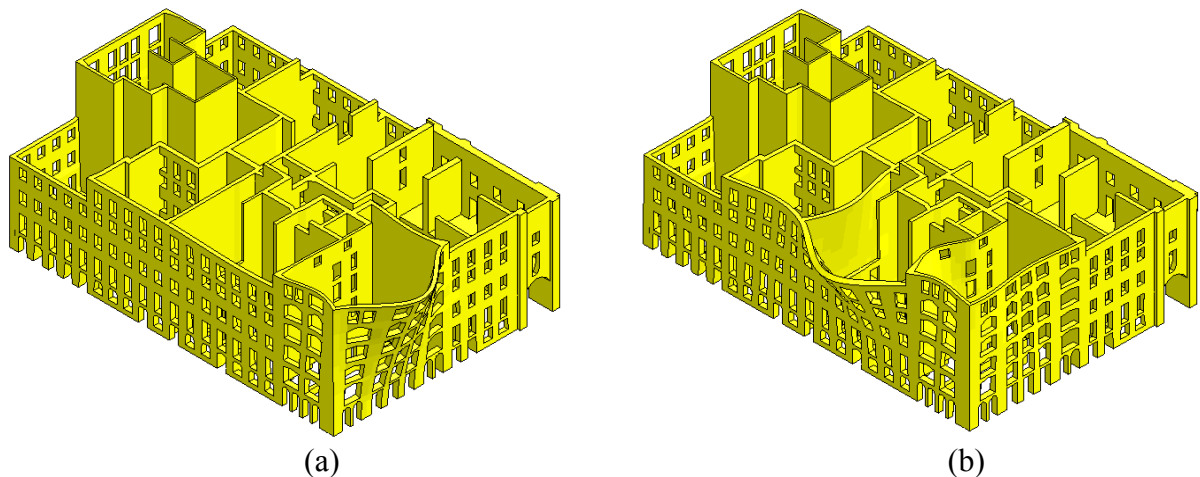
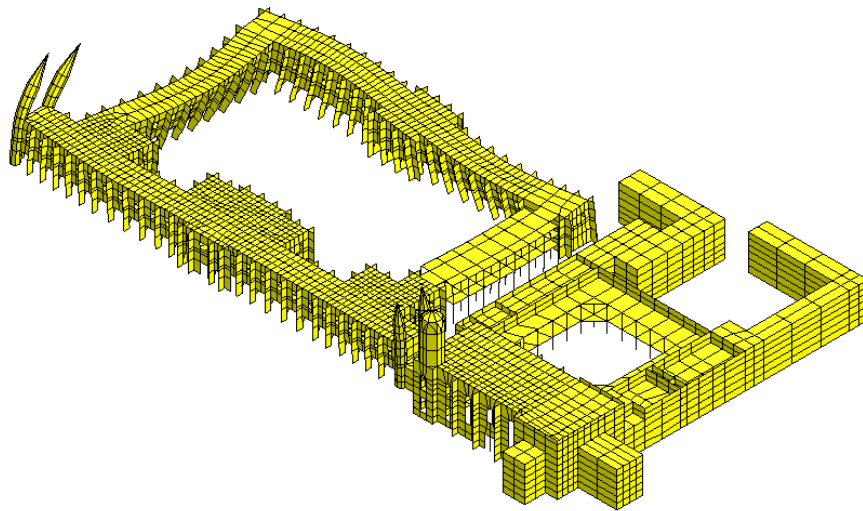


Figura 12 – Estudo preliminar do quarteirão do Martinho da Arcada: (a) modo de vibração 1 –  $f_1 = 0.92$  Hz e (b) modo de vibração 2 –  $f_2 = 1.33$  Hz

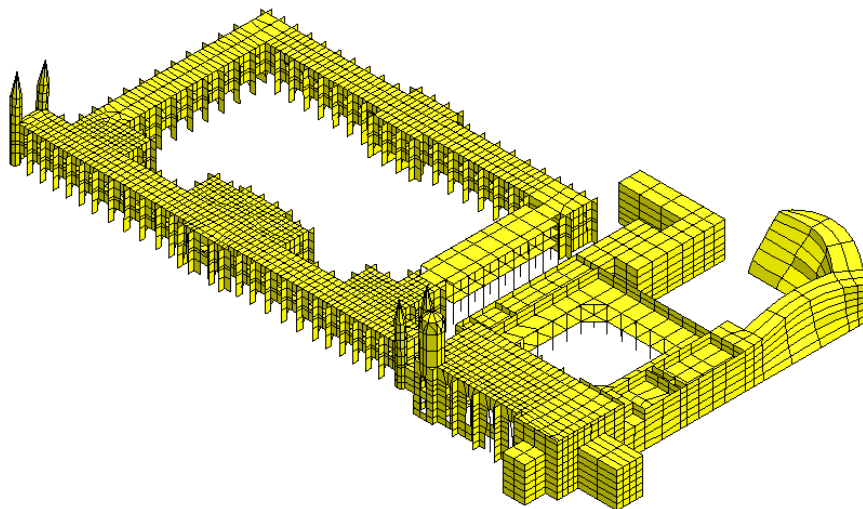
O segundo caso de estudo aqui apresentado é, talvez, o monumento mais emblemático do património arquitectónico português e trata-se do Mosteiro dos Jerónimos. O conjunto monumental resistiu bem ao terramoto de 1 de Novembro de 1755 mas, em Dezembro de 1756, novo tremor de terra fez ruir uma coluna do corpo da igreja, que servia de apoio à abóbada das naves, e fez ruir parte dessa abóbada. Terá sido por essa época que ruiu também a abóbada do vão do arco do meio, em que assenta o coro alto. Para além disso, durante o século XIX, assistiu-se à desfiguração do conjunto, tendo-se desmantelado as acomodações domésticas dos frades, a biblioteca, o relógio da torre, os altares do coro e do claustro. Entre outras modificações e demolições, substituiu-se a torre octogonal da igreja. Mais recentemente, as reparações nos telhados conduziram a um aumento de massa significativo ao nível das coberturas.

É provável que as alterações verificadas na estrutura tenham reduzido a sua resistência à acção dos sismos. Os resultados já obtidos permitem constatar que a zona mais crítica do conjunto são os pilares que apoiam a nave principal da Igreja de Santa Maria de Belém. Para

além dos pilares, as zonas das torres e alas posteriores do museu da Marinha bem como a Casa Pia parecem ser as zonas mais afectadas na ocorrência de um terramoto, ver Figura 13. Salienta-se que as frequências obtidas são particularmente elevadas pelo que os sismos com epicentro afastado serão em princípio mais gravosos para esta estrutura.



(a)



(b)

Figura 13 – Estudo preliminar do conjunto monumental dos Jerónimos (a) modo de vibração 1 –  $f_1 = 3.05$  Hz e (b) modo de vibração 3 –  $f_3 = 3.93$  Hz

## 5. CONCLUSÕES

São apresentados exemplos de inspecção e análise do património monumental em Portugal. Os resultados indicam que os estudos permitem recomendar intervenções adequadas nas estruturas, de acordo com os modernos princípios de intervenção. É inquestionável que a moderna postura, de maximizar o estudo e minimizar a intervenção, resulta em benefícios acrescidos na protecção e desempenho de construções antigas.

## 6. AGRADECIMENTOS

O autor contou com a colaboração de diferentes colegas para a realização dos presentes trabalhos, entre os quais se incluem Daniel Oliveira, Francisco Martins, Luís Ramos e Sara Mourão (Universidade do Minho), António Vicente e Vítor Cóias e Silva (OZ, Lda). A todos se agradece a valiosa contribuição.

## 7. REFERÊNCIAS

Lourenço, P.B., Oliveira, D.V., Mourão, S.C. - *Estudo sobre a estabilidade da Igreja de Santo Cristo em Outeiro*, Relatório 99-DEC/E-2, Universidade do Minho (1999).

Lourenço, P.B., Ramos, L., *Investigação sobre as patologias do Santuário de São Torcato. Relatório Final*, Relatório 99-DEC/E-5, Universidade do Minho (1999).

Martins, F.F., *Relatório de prospecção geotécnica junto ao Santuário de S. Torcato*, Processo LEC 79/97, Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho (1999)

Ramos, L., Lourenço, P.B., *Análise das técnicas de construção pombalina e apreciação do estado de conservação estrutural do quarteirão do Martinho da Arcada*, *Engenharia Civil*, 7, p. 35-46 (2000)