

TÓPICO 4 – Património Histórico

Estratégia de monitorização de monumentos: Caso de estudo - Arco-Cruzeiro da Igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro

Humberto Varum^{1,a}, Romeu Vicente^{1,b}, Hugo Rodrigues^{1,c}, Catarina Fernandes^{1,d}, Aníbal Costa^{1,e}, Paulo André^{2,f}, Rogério Nogueira^{2,g}, Ilda Abe^{2,h}, Hugo Lima^{2,i} e João Lemos Pinto^{1,j}

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

²Departamento de Física/Instituto de Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

^ahvarum@ua.pt, ^bromvic@ua.pt, ^chrodrigues@ua.pt, ^dcfernandes@ua.pt, ^eagc@ua.pt, ^fpandre@ua.pt, ^grnogueira@av.it.pt, ^hilda@ua.pt, ⁱhlima@ua.pt, ^jjp@ua.pt,

Palavras-chave: Monitorização, Redes de Bragg, Monumentos, Modelos numéricos

Resumo. O estado de conservação das construções tradicionais motiva para um crescente interesse na recuperação e manutenção do património construído. Antes de mais, é importante obter uma visão geral da evolução temporal das construções permitindo assim a caracterização dos diversos aspectos estruturais e construtivos. Este trabalho foi desenvolvido com o objectivo de estudar as patologias associadas à nave principal da Igreja da Misericórdia de Aveiro e em particular as patologias associadas ao Arco-Cruzeiro que se encontra no interior desta, com o intuito de se estabelecer a melhor estratégia de monitorização dos danos estruturais a aplicar. Como resultado desta análise foi proposto e implementado um plano de monitorização, com o desenvolvimento de meios de instrumentação, que permitem monitorizar o comportamento estrutural do arco, de forma não intrusiva, garantindo a reversibilidade e a eventual futura extensão da instrumentação. Foi ainda desenvolvido um modelo numérico que serviu de apoio à interpretação dos danos estruturais encontrados.

1. Introdução

A análise do comportamento de estruturas no contexto da avaliação do estado de conservação do património construído, constitui um domínio de investigação de grande interesse e actualidade. O tema assume maior importância no âmbito das construções de elevado interesse histórico e cultural, como é o caso dos monumentos, em que a complexidade da análise estrutural é, em geral, o factor dominante [1].

A Santa Casa da Misericórdia de Aveiro data do século XVII e dela faz parte a Igreja da Misericórdia (ver Fig. 1). É uma estrutura classificada como imóvel de Interesse Público que já contempla algum tempo de vida requerendo cuidados acrescidos.

Após constatação, por parte dos técnicos da Santa Casa da Misericórdia, de alguns danos na zona do Arco-Cruzeiro da Igreja, foi solicitado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro um estudo de estabilidade e condições de segurança deste elemento (ver Fig. 2).



Figura 1: Alçado principal da Igreja da Misericórdia de Aveiro



Figura 2: Interior da Igreja: vista geral do Arco-Cruzeiro

As visitas ao local da obra para verificação da estabilidade e condições de segurança estrutural global permitiram concluir que não estava em causa a estabilidade da estrutura. Foi no entanto realizado um levantamento detalhado de todos os danos observáveis, e definido um plano de monitorização para acompanhar a evolução das deformações no Arco-Cruzeiro, recorrendo-se para isso à tecnologia dos sensores em fibra óptica.

2. Avaliação e diagnóstico da Igreja

2.1 Identificação das patologias globais

As inspeções preliminares feitas na Igreja da Misericórdia permitiram identificar, em termos gerais, as principais patologias existentes na Igreja. Estas foram registadas unicamente com recurso a observação visual e a registo fotográfico, e podem resumir-se a: degradação do material pétreo (pedra de Ançã); presença de poluição biológica; presença de humidade no interior da estrutura devido ao deficiente encaminhamento das águas pluviais e eventual falta de manutenção; fissuras longitudinais ao longo de toda a cúpula; movimento longitudinal da abóbada em relação ao tímpano; perda de argamassa nas juntas entre pedras; presença de musgos e bolores.

2.2 Identificação das patologias no Arco-Cruzeiro

No caso específico do Arco-Cruzeiro, foram identificados alguns danos graves nas pedras centrais. Para possibilitar um diagnóstico mais aprofundado recorreu-se à instalação de um sistema de elevação (andaimas), que posteriormente possibilitou também a instalação do sistema de monitorização para uma avaliação contínua dos movimentos da estrutura, nomeadamente das pedras do arco. Os principais danos verificados no Arco-Cruzeiro foram: abertura de juntas de dimensões variáveis; escorregamento entre pedras; e, movimento de rotação das pedras da consola da estrutura. Na Fig. 3 é representada a geometria global do Arco-Cruzeiro e a localização das principais patologias diagnosticadas.

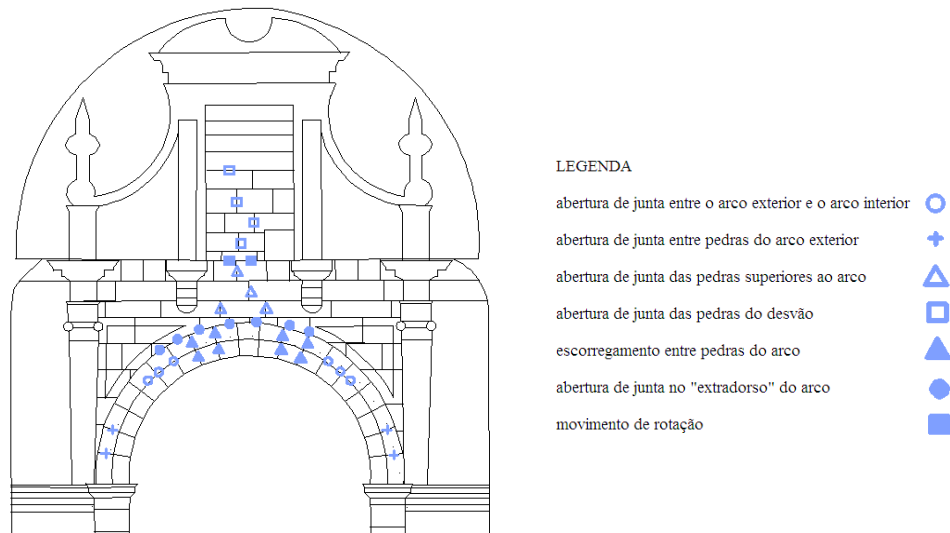


Figura 3: Localização das principais patologias verificadas no Arco-Cruzeiro

A abertura de juntas foi detectada entre os arcos interior e exterior do Arco-Cruzeiro, nas pedras do próprio arco, nas pedras superiores ao arco e nas pedras do desvão. A abertura de juntas entre os arcos interior e exterior tem como causa mais provável a movimentação destes elementos, devida ao peso próprio da estrutura, a fenómenos de fluência e a possíveis assentamentos de apoio. Está presente na globalidade da estrutura do arco, apresentando uma distribuindo-se homogénea e dimensões variáveis de ponto para ponto. A abertura de juntas entre pedras localiza-se com maior incidência nas zonas mais esforçadas do arco, situadas acima dos pilares. A abertura de juntas nas pedras acima do arco poderá estar relacionada com o movimento de todo o conjunto do arco devido a um processo natural de envelhecimento dos materiais. No desvão foram observados os maiores deslocamentos, tanto em juntas verticais como em juntas horizontais, o que estará directamente relacionado com as grandes amplitudes térmicas existentes nesta zona.

Nas Figs. 4 e 5 são apresentados alguns exemplos das aberturas de juntas observadas.



Figura 4: Abertura de junta entre os arcos interior e exterior



Figura 5: Abertura de junta nas pedras do desvão

O escorregamento entre pedras consecutivas do Arco-Cruzeiro foi observado sobretudo em zonas em que existe abertura de juntas e movimentos verticais das pedras (ver Fig. 6). Devido a

estes movimentos de escorregamento verificou-se um abatimento do arco por descompressão que levaram a aberturas significativas das juntas de alvenaria do tímpano e a pequenos deslocamentos e rotações nas pedras da consola.

As pedras centrais constituintes da consola indiciam um movimento de rotação que se associa ao restante movimento do arco, quer ele seja de escorregamento, quer seja de abertura de junta (ver Fig. 7). Estes movimentos de rotação poderão estar relacionados com o facto da estrutura do Arco-Cruzeiro ser constituída por pedra de Ançã, um material relativamente pesado, com a agravante da argamassa das juntas se encontrar degradada.



Figura 6: Escorregamento entre pedras do arco



Figura 7: Movimento de rotação

A partir da identificação e localização dos principais danos na zona do arco e do tímpano, é possível traçar de forma quase inequívoca o “caminho crítico”, correspondente à zona de fragilização do Arco-Cruzeiro, cuja representação é feita na Fig. 8. O caminho traçado percorre toda a zona do tímpano, passando depois pelas várias fiadas de pedras, nomeadamente pelas pedras centrais que se encontrem imediatamente abaixo deste, terminando no arco exterior.

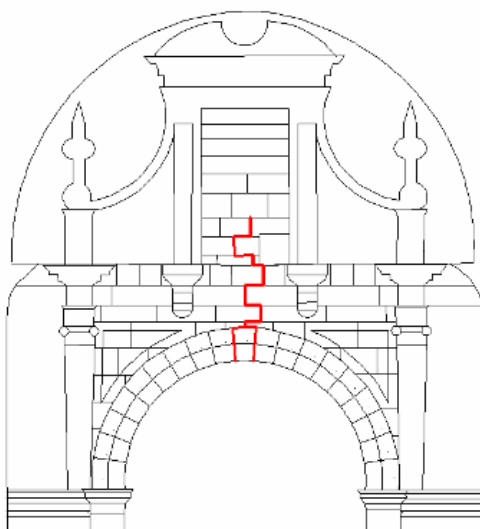


Figura 8: Fragilização do Arco-Cruzeiro

3. Sistema de Monitorização

3.1 Enquadramento

A monitorização de estruturas de Engenharia Civil tem como principal objectivo a obtenção de um registo contínuo dos principais parâmetros controladores do movimento da estrutura (deslocamentos, deformações, temperatura e outros). Nas estruturas em que haja necessidade de proceder a intervenções de reparação, de reabilitação ou de reforço, o sistema de monitorização já instalado, ou a instalação de um especificamente para o efeito, pode fornecer dados essenciais, indispensáveis à elaboração do respectivo projecto. A observação estrutural, após qualquer uma

destas intervenções, pode então ser usada com o objectivo de se analisar a eficiência das soluções adoptadas.

Para a monitorização da Igreja da Misericórdia foi adoptado um sistema de fibra óptica que permite medir uma determinada grandeza física por alteração de uma propriedade da luz propagada na fibra óptica e apresentam diversas vantagens sobre outros tipos de sensores convencionais.

Um sensor de fibra óptica embebido ou aderido a uma estrutura deve ser capaz de detectar modificações na mesma, de uma maneira precisa e fiável, ao longo de toda a vida útil da mesma. No entanto, os materiais são atacáveis por muitos dos elementos presentes no meio ambiente, desencadeando diversas reacções que podem afectar negativamente os sensores.

3.2 Monitorização do Arco-Cruzeiro com Redes de Bragg

Para a monitorização do arco da Igreja da Misericórdia, recorreu-se à implementação de sensores de fibra óptica com a tecnologia das Redes de Bragg para a medição de deformações e temperatura. A preparação dos sensores ficou a cargo do Departamento de Física e do Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro, que colaboraram também na sua instalação no arco.

O sistema foi testado em laboratório e *in-situ* e só depois foi aplicado no Arco-Cruzeiro. Os vários sensores foram instalados de forma a monitorizar quer a abertura de fendas quer o escorregamento de pedras. Significa isto que a disposição do transdutor varia consoante o tipo de danos. Assim, se era pretendido monitorizar a abertura de fendas a fibra era colocada perpendicular o quanto possível à abertura de junta, caso o objectivo fosse monitorizar escorregamento entre pedras a fibra era colocada paralela à junta em causa (ver Fig. 9). É de referir que neste sistema foram instalados simultaneamente cinco sensores de temperatura, colocados estrategicamente a várias cotas para registar a variação da temperatura ao longo da monitorização.



Figura 9: Exemplo de aplicação dos sensores de fibra óptica

O facto da fibra óptica ser transparente aliado às reduzidas dimensões dos próprios transdutores, resulta numa imperceptibilidade visual do sistema após a sua instalação (ver Fig. 10).



Figura 10: Aspecto final do Arco-Cruzeiro após instalação do sistema de monitorização

4. Resultados preliminares

Os resultados aqui apresentados surgem em sequência da aquisição de dados que tem sido vindo a ser feita, e que será prolongada por mais cerca de 4 anos, uma vez por mês, a partir do momento que todo o sistema ficou instalado.

São aqui apresentados os gráficos resultantes do sistema de monitorização, agrupados por áreas chave em função da sua disposição no Arco-Cruzeiro. A leitura dos dados torna-se assim mais objectiva e a comparação entre os vários pontos que monitorizam movimentos com características idênticas é realizada de uma forma mais rápida. Cada um dos pontos de monitorização (PM) foi agrupado consoante o tipo de informação que fornece e a posição em que foi colocado.

A partir destes gráficos é possível concluir que não existem variações relevantes entre a noite e o dia, as deformações medidas estão dentro do erro de medição, e de uma forma geral a deformação varia consoante a variação de temperatura, isto é, na maioria dos gráficos a variação da deformação acompanha a variação da temperatura, não sendo esta significativa.

Neste tipo de monitorização os resultados tendem a ser relevantes quando passados pelo menos seis meses desde a sua instalação. Assim, dado o curto prazo de aquisição de resultados, é ainda prematuro discutir os resultados obtidos e tirar conclusões sobre os possíveis movimentos estruturais.

O ponto PM2 (ver Fig. 11), que corresponde ao controlo da deformação no topo do arco, apresenta uma tendência clara de abertura de junta entre arcos.

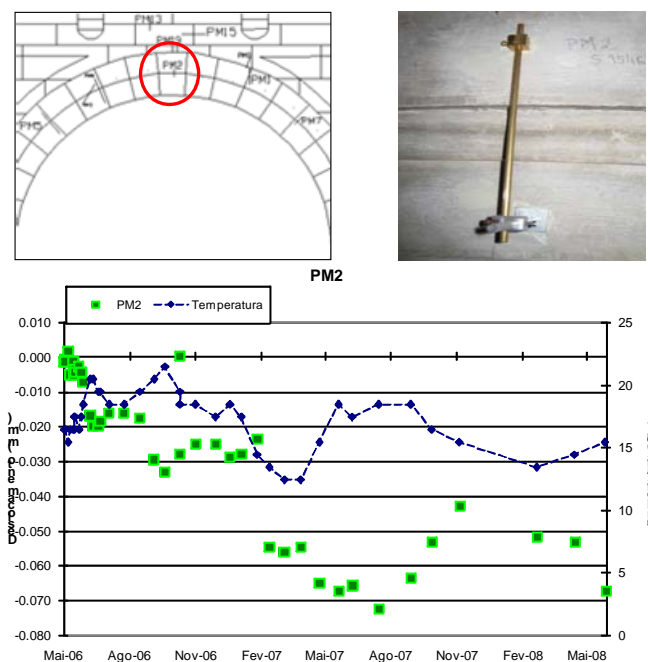
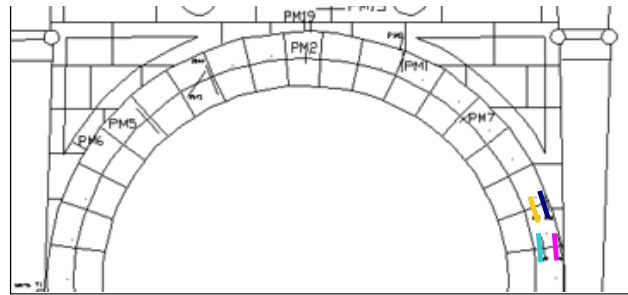


Figura 11: Ponto de monitorização PM2

Na Fig. 12 são apresentadas as deformações medidas na zona de arranque do arco, correspondentes a deformações cíclicas reversíveis, com excepção dos deslocamentos medidos no sensor PM9. Na Fig. 13 pode observar-se a evolução do movimento relativo entre arcos, que manifesta deformações irreversíveis, particularmente no lado direito do arco.



PM9 - 10 - 11 - 12

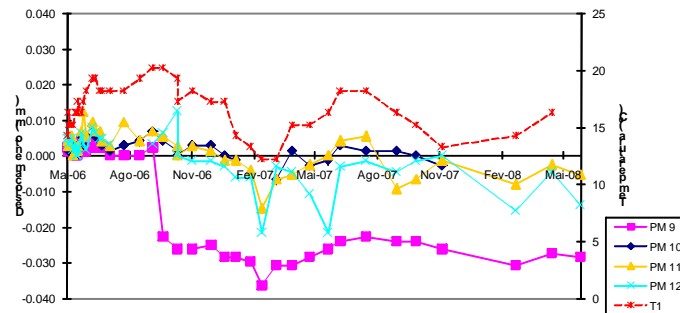
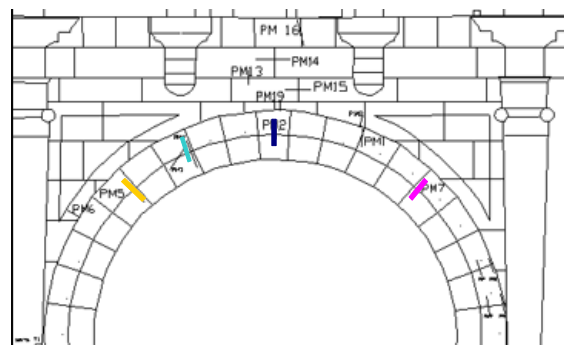


Figura 12: Pontos de monitorização PM9, PM10, PM11 e PM 12



PM 2 - 4 - 5 - 7

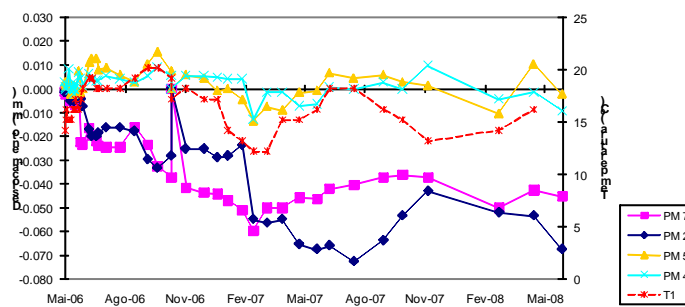
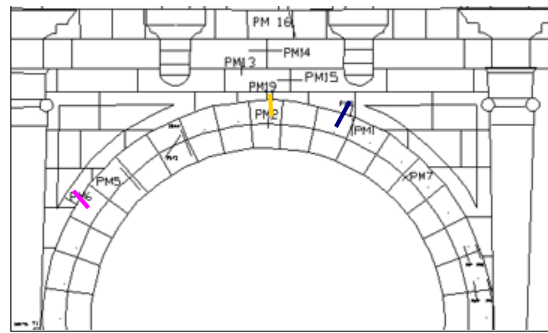


Figura 13: Pontos de monitorização PM2, PM4, PM5 e PM 7

Na Fig. 14 observa-se o movimento relativo entre o arco de extradorso e a parede. As deformações intensificaram-se a partir de Janeiro de 2007.



PM6 - 8 - 19

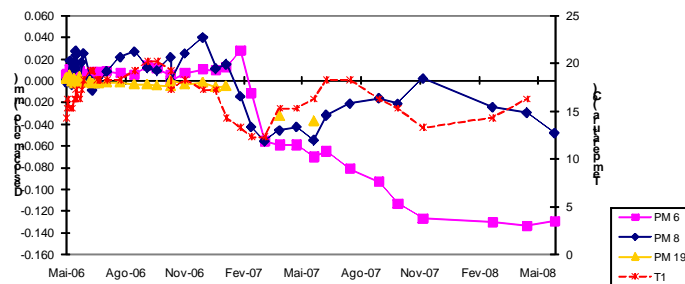


Figura 14: Pontos de monitorização PM6, PM8 e PM19

5. Modelo estrutural

Para a compreensão do comportamento estrutural do arco da Igreja da Misericórdia, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional num programa de elementos finitos [2], no qual serão realizadas as análises estáticas e dinâmicas, a partir do levantamento das características geométricas da estrutura existente.).

5.1 Geometria da estrutura e malha de elementos finitos

Para a definição do modelo estrutural é necessário caracterizar a geometria da estrutura, as propriedades dos materiais, as condições fronteira e as acções. Das análises numéricas derivam resultados em termos de campos de deslocamentos e tensões, para cada caso de carga ou combinação de acções, que permitem compreender e interpretar o comportamento da estrutura [3].

Na modelação da Igreja da Misericórdia foram utilizados elementos finitos de casca triangulares de três nós, e adoptado um modelo de comportamento elástico-linear e isotrópico.

A geometria do Arco-Cruzeiro foi obtida com base num levantamento topográfico rigoroso complementado com fotografias e visitas técnicas à Igreja. Sendo o primeiro objectivo deste estudo a compreensão do comportamento do Arco-Cruzeiro, optou-se por fazer uma modelação rigorosa apenas do arco e dos elementos envolventes, sendo a restante Igreja modelada de uma forma simplificada. Para o modelo global (ver Fig. 15) foram testados diferentes refinamentos, de forma a otimizar o tempo de cálculo e os erros numéricos.

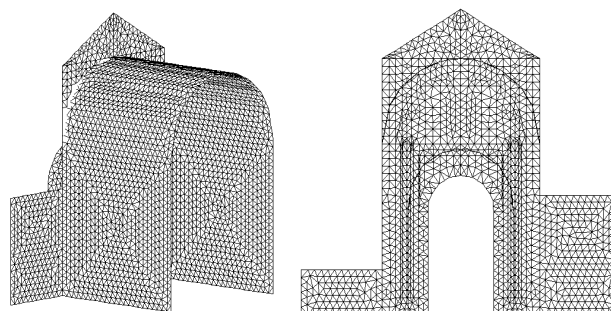


Figura 15: Malha de elementos finitos adoptada no modelo numérico

Foram consideradas como condições de fronteira as que melhor representam o real comportamento da estrutura. Assim, por se desconhecerem o tipo de fundação, o seu estado de conservação e as características do solo, foram adoptados apoios rígidos em todos os pontos da base das paredes, impedindo os deslocamentos nas três direcções e as rotações destes pontos em torno de um eixo horizontal segundo o desenvolvimento de cada parede.

O conhecimento das características físicas e mecânicas dos materiais constituintes de uma estrutura é fundamental na avaliação do comportamento quando submetida a solicitações de carácter estático e dinâmico. Esta preocupação deve ser mais pronunciada quando se trata de um edifício de interesse histórico. Contudo, na maioria dos casos, existem muitas incertezas associadas às propriedades destes materiais, devido à idade avançada e consequente degradação destas construções, às técnicas de construção e materiais utilizados, muito diferentes dos utilizados actualmente, à falta de documentação e estudos nestas áreas [4].

A pedra utilizada no arco é pedra Ançã. Da pesquisa bibliográfica realizada foram adoptados para as propriedades mais relevantes dos materiais em causa os valores resumidos na Tabela 1. No modelo estrutural foi considerado apenas um material tipo admitindo o comportamento elástico, linear e isotrópico.

No que diz respeito às acções actuantes, foi considerado inicialmente apenas o peso próprio das paredes e dos elementos decorativos existentes. A experiência demonstra que em muitas estruturas deste tipo, ou pelo menos em alguns elementos construtivos, algumas das patologias encontradas são devidas ao elevado nível de tensões instaladas na estrutura pela acção do seu próprio peso. No entanto, para certas combinações de acções, este poderá ter uma importante contribuição na estabilidade da estrutura.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais adoptadas no modelo numérico

Material	E (MPa)	ν	γ (kN/m ³)	Tensão resistente (MPa)	
				Tracção σ_o	Compressão
Alvenaria de pedra	2000	0.15	22.0	0.05	1.00

em que: E – Módulo de elasticidade; ν - Coeficiente de Poisson; γ - Peso volúmico

5.2 Resultados dos modelos numéricos

Nesta secção são apresentados e discutidos os primeiros resultados das análises numéricas realizadas sobre o arco em estudo, em termos de tensões máximas e deformações. Para a interpretação das causas dos danos existentes na estrutura foi feita a comparação dos resultados obtidos com o modelo numérico em termos de tensões principais máximas positivas com os danos observados na estrutura. Na Fig. 16 são representadas as tensões principais máximas (σ_1) para a acção do peso próprio das paredes, apenas para as zonas onde é excedido o limite de resistência em tracção (apresentado na Tabela 1).

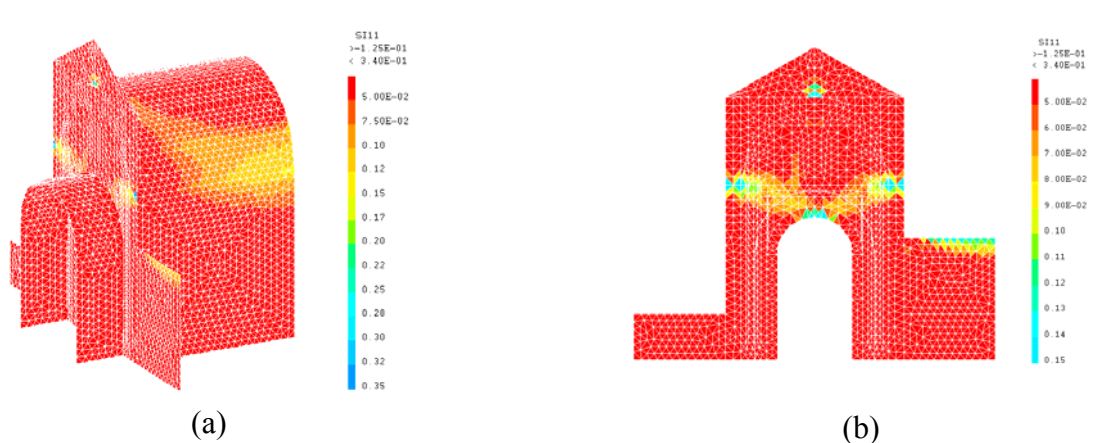


Figura 16: Tensões σ_1 : a) tensões principais máximas globais; b) tensões máximas globais no arco

Na Fig. 17 são confrontados os danos observados com os resultados da análise numérica em termos de tensões principais máximas σ_1 positivas. Como se pode observar, o efeito do peso próprio da estrutura faz aparecer tracções em zonas localizadas que ultrapassam o limite de resistência do material e, portanto, justificam o aparecimento de fissuras observadas.

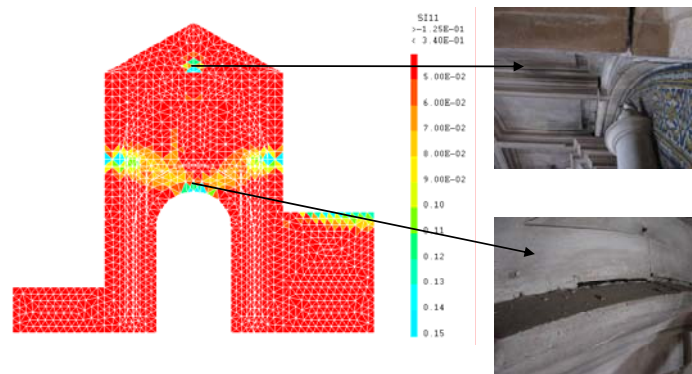


Figura 17: Confronto dos resultados obtidos com o modelo numérico e os danos observados

6. Considerações finais

Este trabalho envolveu o levantamento das patologias da nave principal da Igreja da Misericórdia, o desenvolvimento e a aplicação do sistema de monitorização adequado para os danos observados e a análise estrutural do Arco-Cruzeiro da Igreja da Misericórdia de Aveiro. Da recolha de dados feita durante o primeiro ano é possível retirar conclusões preliminares acerca do comportamento da zona em estudo. Este projecto de monitorização será continuado nos próximos 4 anos.

Em primeiro lugar, há que referir que o levantamento topográfico rigoroso foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, possibilitando uma pormenorizada discretização das unidades (pedras) que constituem o Arco-Cruzeiro. Ainda que, em alguns pontos, foi necessário complementar e validar o levantamento original, este foi importante para a interpretação do funcionamento da estrutura em análise.

As propriedades dos materiais foram estimadas com base em ensaios e estudos de outros autores sobre materiais e elementos estruturais similares neste tipo de monumentos. Contudo, é reconhecida a necessidade de realização de ensaios complementares de caracterização material, por exemplo, com recurso a ensaios mecânicos sobre amostras retiradas *in-situ*, boroscopia, de forma a estimar com maior rigor as propriedades e constituição dos elementos constituintes da Igreja.

7. Agradecimentos

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da FCT, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

Os autores agradecem a contribuição da Engenheira Ana Valente e do Engenheiro Nuno Brandão por todo o trabalho desenvolvido no trabalho final de curso no âmbito deste projecto.

Referências

- [1] A. Costa e A. Arêde: *Conservação e a Reabilitação do Património Edificado, 1^{as} Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro “Avaliação e Reabilitação das Construções Existentes”*, Aveiro, Portugal (2004), pp. 29-70.
- [2] CEA: *CASTEM 2000, Guide s'utilisation*, CEA, França (1990).
- [3] H. Varum: *Seismic assessment, strengthening and repair of existing buildings*, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal (2003).
- [4] H. Varum e H. Rodrigues: *Avaliação do comportamento estrutural da torre medieval de Vilharigues, Vouzela*, Congresso Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidade de Granada, Granada, Espanha (2005).
- [5] A. Valente e N. Brandão: *Caracterização e monitorização estrutural*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal (2006).
- [6] A. Costa, H. Varum, R. Vicente, H. Rodrigues, C. Fernandes, N. Brandão, A. Valente, J. L. Pinto, P. André, R. Nogueira, I. Abe e H. Lima: *Levantamento das patologias estruturais e monitorização do Arco-Cruzeiro da Igreja da Misericórdia*, Relatório Técnico, Aveiro, Portugal (2006).