

# LEVANTAMENTO DAS PATOLOGIAS E MONITORIZAÇÃO DO ARCO-CRUZEIRO DA IGREJA DA MISERICÓRDIA DE AVEIRO

Varum, H. <sup>1\*</sup>; Vicente, R. <sup>2\*</sup>; Rodrigues, H. <sup>3\*</sup>; Fernandes, C. <sup>3\*</sup>; Costa, A. <sup>4\*</sup>; André, P. <sup>1\*\*</sup>; Nogueira, R. <sup>1\*\*</sup>; Abe, I. <sup>1\*\*</sup>; Lima, H. <sup>2\*\*</sup>; Pinto, J.L. <sup>4\*\*</sup>

<sup>1</sup>Prof. Auxiliar/Investigador Auxiliar, <sup>2</sup>Assistente/Aluno de Doutoramento, <sup>3</sup>Engenheiro, <sup>4</sup>Prof. Catedrático

<sup>\*</sup>Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

<sup>\*\*</sup>Departamento de Física/Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro

## 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 em elementos finitos que serviu de apoio à interpretação das causas 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 [Costa e Arêde (2004)].

A Santa Casa da Misericórdia de Aveiro nasceu no séc. XVII. Dela faz parte a Igreja da Misericórdia de Aveiro (ver

figura 1). É uma estrutura classificada como imóvel de Interesse Público que já contempla algum tempo de vida requerendo cuidados acrescidos.



Fig 1 – Alçado principal da Igreja da Misericórdia de Aveiro

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



Fig 2 – Interior da Igreja: vista geral do Arco-Cruzeiro

Foi desenvolvido um plano de monitorização, recorrendo a uma tecnologia inovadora, para acompanhar a evolução das deformações no Arco-Cruzeiro da Igreja da Misericórdia.

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 observados e definido um plano de monitorização usando a 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 abóboda 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. A fim de ser feito um diagnóstico mais aprofundado recorreu-se à instalação de um sistema de elevação (andaimes), que posteriormente possibilitou 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 figura 3 está representada a geometria global do Arco-Cruzeiro e a localização das principais patologias diagnosticadas.

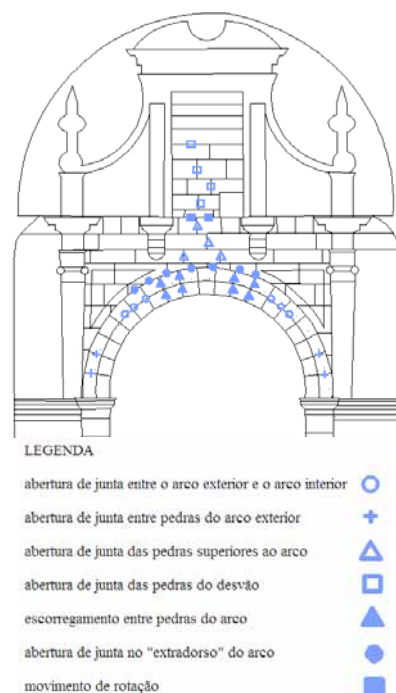


Fig 3 – Localização das principais patologias verificadas no Arco-Cruzeiro.

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 homogênea 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 figuras 4 e 5 são apresentados alguns exemplos das aberturas de juntas observadas.



Fig. 4 – Abertura de junta entre os arcos interior e exterior



Fig 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 figura 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.



Fig 6 – Escorregamento entre pedras do arco

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. 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.



Fig 6 – 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 figura 7. 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.

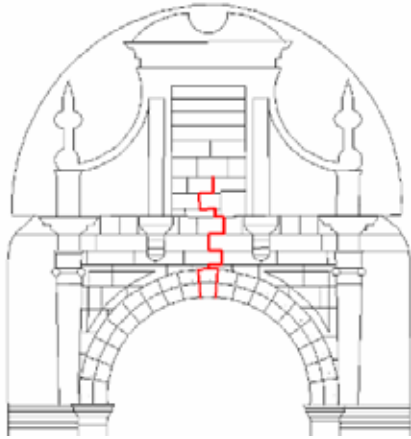


Fig 7 – Fragilização do Arco-Cruzeiro: “caminho crítico”

### 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 projecto respectivo. 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 se procedeu à sua aplicação 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 sendo, 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 figura 8). 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.



Fig 8 – 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 figura 9).



Fig 9 – 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 5 anos, uma vez por mês, a partir do momento que todo o sistema ficou instalado.

De seguida são apresentados os gráficos, agrupados por áreas chave em função da sua disposição no Arco-Cruzeiro. Desta forma a leitura dos dados é 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. 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 figura 10), que corresponde ao controlo da deformação no

topo do arco, apresenta uma tendência clara de abertura de junta entre arcos.

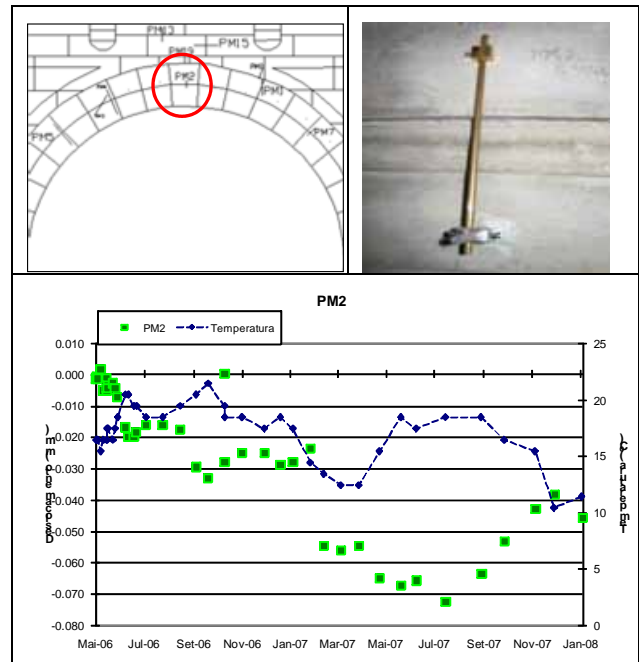


Fig 10 – Ponto de monitorização PM2

Na figura 11 são apresentadas as deformações medidas na zona de arranque do arco, correspondentes a deformações cíclicas reversíveis, com excepção dos deslocamentos medidos no sensor PM9.

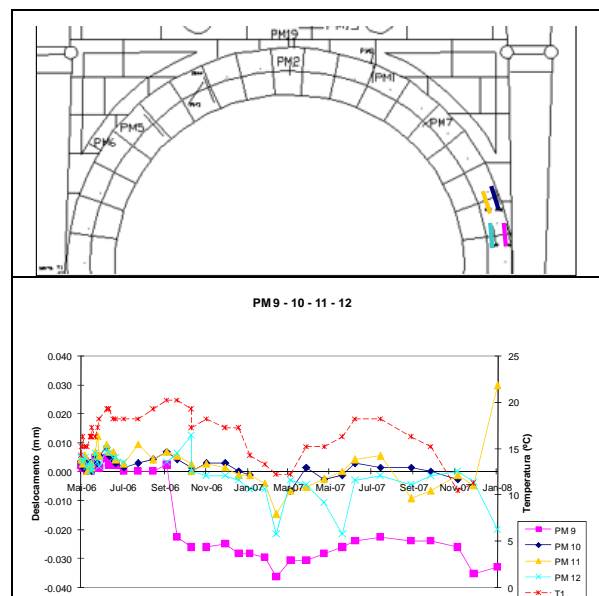


Fig 11 – Ponto de monitorização PM8, PM10, PM11 e PM12

Na figura 12 pode observar-se a evolução do movimento relativo entre arcos, que manifesta deformações

irreversíveis, particularmente no lado direito do arco.

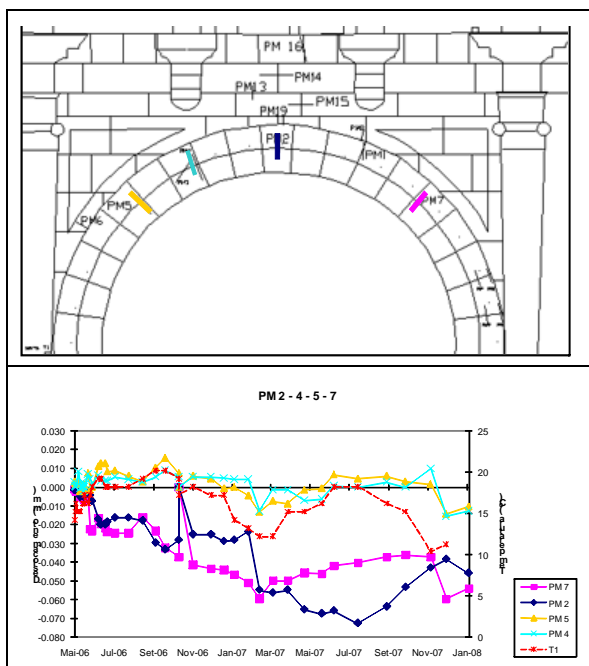


Fig 12 – Ponto de monitorização PM2, PM4, PM5 e PM12

Na figura 13 observa-se o movimento relativo entre o arco de extradorso e a parede. As deformações intensificaram-se a partir de Janeiro de 2007.

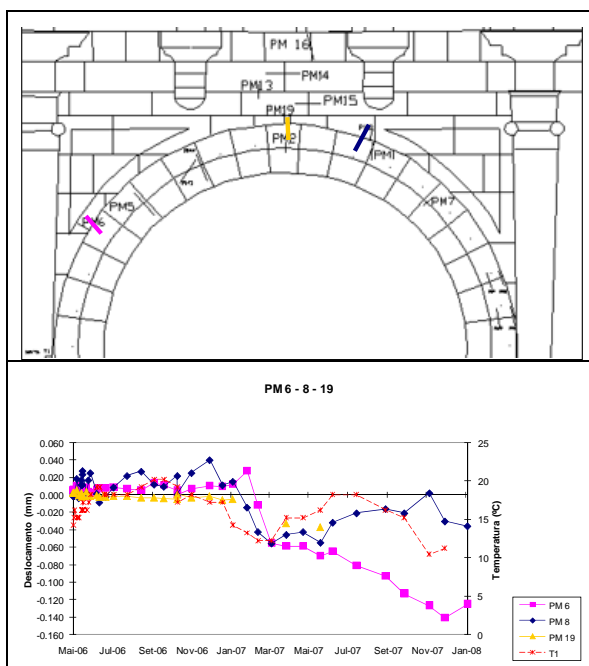


Fig 13 – Ponto de monitorização PM6, PM8, PM19

## 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 [CEA (1990)], 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 [Varum (2003)].

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

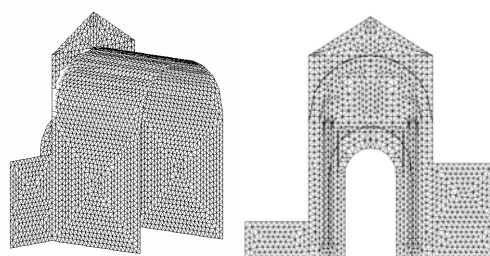


Fig 14 – Malha de elementos finitos adoptada no modelo numérico

A geometria do Arco-Cruzeiro da Igreja de Misericórdia foi obtida com base num levantamento topográfico rigoroso complementado com fotografias e visitas técnicas à Igreja. Dado o primeiro objectivo deste estudo a compreensão do comportamento do Arco-Cruzeiro da Igreja da Misericórdia, foi apenas modelado com rigor o Arco-Cruzeiro e os elementos envolventes, sendo a restante Igreja modelada de uma forma

simplificada. Para o modelo global (ver figura 14) foram testados diferentes refinamentos, de forma a otimizar o tempo de cálculo e os erros numéricos.

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 [Varum e Rodrigues (2005)].

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)	$\nu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Tensão resistente (MPa)	
				Tracção	Comp.
Alvenaria de pedra	2000	0.15	22.0	0.05	1.00

em que: E – Módulo de elasticidade;  $\nu$  - Coeficiente de Poisson;  $\gamma$  - 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 procedeu-se à comparação dos resultados obtidos com o modelo numérico em termos de tensões principais máximas positivas com os danos observados na estrutura. Nas figuras 15 e 16 são representadas as tensões principais máximas ( $\sigma_1$ ) 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).

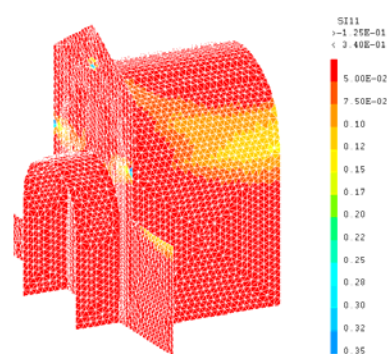


Fig 15 – Tensões  $\sigma_1$  (tensões principais máximas) globais

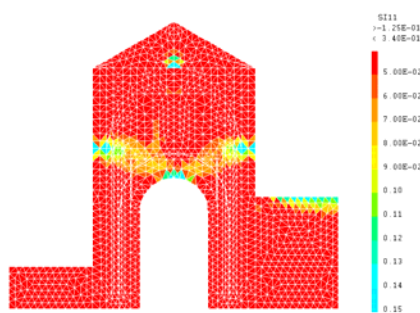


Fig 16 – Tensões  $\sigma_1$  (tensões máximas) globais no arco

Na figura 17 são confrontados os danos observados com os resultados da análise numérica em termos de tensões principais máximas  $\sigma_1$  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.

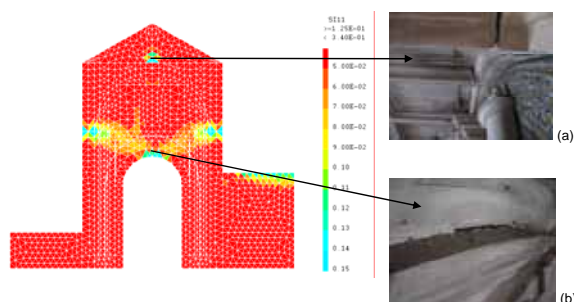


Fig 17 – Confronto dos resultados obtidos com o modelo numérico e os danos observados

## 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 durante os seis primeiros meses é possível retirar conclusões preliminares acerca do comportamento da zona em estudo. Este projecto de monitorização será continuado nos próximos 5 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.

## 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

- Costa, A. e Arêde, A., Conservação e a Reabilitação do Património Edificado, 1<sup>as</sup> Jornadas Eng<sup>a</sup> Civil da UA - Avaliação e Reabilitação das Construções Existentes, pag. 29-70, Aveiro, 2004
- CEA, CASTEM 2000, Guide d'utilisation, CEA, França, 1990
- Varum, H., Seismic assessment, strengthening and repair of existing buildings, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 2003
- Varum, H. e Rodrigues, H., Avaliação do comportamento estrutural da torre medieval de Vilharigues, Vouzela, Cong. Métodos Num. Ing., Univ. Granada, Granada, 2005
- Valente, A. e Brandão, N., Caracterização e monitorização estrutural - Departamento de Eng. Civil da UA, Aveiro, Julho de 2006
- Costa, A., Varum, H., Vicente, R., Fernandes, C., Brandão, N., Valente, A., Pinto, J. L., André, P., Nogueira, R., Abe, I. e Lima, H., Levantamento das patologias estruturais e monitorização do Arco-Cruzeiro da Igreja da Misericórdia de Aveiro – Relatório Técnico, Aveiro, 2006