

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

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

\* Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

\*\* 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 deste património. 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 a aplicar para controlo da evolução dos danos estruturais observados. Como resultado desta análise das patologias, foi proposto e implementado um plano de monitorização do arco-cruzeiro, com um sistema de instrumentação que permite monitorizar a evolução das deformações de forma não intrusiva, garantindo a reversibilidade e a eventual futura extensão do sistema de instrumentação. Foi ainda desenvolvido um modelo numérico em elementos finitos para interpretação das causas dos danos estruturais observados.*

## 1 - INTRODUÇÃO

No contexto da avaliação do estado de conservação do património construído, a análise do comportamento das estruturas de alvenaria constitui um domínio de investigação de grande interesse, dada a complexidade destas estruturas. Este 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 foi instituída no séc. XVII. Dela faz parte a Igreja da Misericórdia de Aveiro (ver figura

- 1). É uma estrutura classificada como imóvel de Interesse Público.



Fig 1 - Alçado principal da Igreja da Misericórdia de Aveiro

Após constatação, pelos responsáveis e técnicos da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro, de alguns danos estruturais na zona do arco-cruzeiro da Igreja, foi solicitado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro um estudo de estabilidade e das condições de segurança do arco-cruzeiro (ver figura 2).



**Fig 2** - Interior da Igreja: arco-cruzeiro e envolvente

Foi desenvolvido e implementado um plano de monitorização recorrendo a sensores de fibra óptica, descrito na secção 3, para registar a evolução das deformações num conjunto de pontos seleccionados do arco-cruzeiro da Igreja. Das visitas ao local da obra para verificação da estabilidade e condições de segurança estrutural global, não foram observados indícios claros que indicassem potenciais problemas de estabilidade da estrutura. Foi, no entanto, realizado um levantamento detalhado de todos os danos nesta zona da igreja e ainda proposto e implementado um sistema de monitorização usando sensores de fibra óptica. Com a monitorização desenvolvida pretende-se, por um lado, registar a evolução das deformações com o tempo, que poderá servir como sistema de alerta caso as deformações evoluam significativamente e, por outro lado, servir de apoio a um eventual projecto de reforço.

## 2 - AVALIAÇÃO E DIAGNÓSTICO DA IGREJA

### 2.1 – Patologias na Igreja

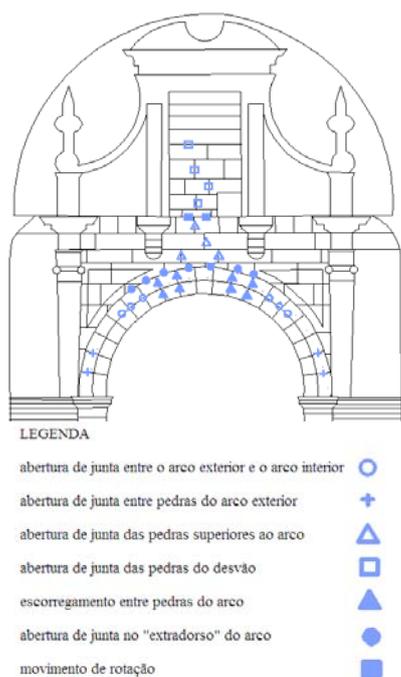
As inspecções preliminares à estrutura da Igreja da Misericórdia permitiram

identificar, em termos gerais, as principais patologias na Igreja. A inspecção geral foi desenvolvida unicamente com recurso à observação visual e a registo fotográfico. As principais patologias observadas foram: degradação do material pétreo dos elementos decorativos (pedra de Ançã); colonização biológica; presença de musgos e bolores; humidades no interior da estrutura devido ao deficiente encaminhamento das águas pluviais e falta de manutenção do revestimento da cobertura e dos sistemas de águas pluviais; fissuras longitudinais ao longo da abóbada da nave principal; movimento longitudinal da abóbada em relação aos tímpanos; e, perda de argamassa nas juntas entre pedras.

### 2.2 – Patologias no arco-cruzeiro

Os principais danos observados no arco-cruzeiro e elementos confinantes foram: abertura de juntas de várias dimensões; escorregamento relativo entre pedras paralelamente às juntas; e, movimento de rotação de alguns elementos em pedra que constituem uma consola sobre o arco [Valente e Brandão (2006), Costa *et al.* (2006)]. Na figura 3 são representadas a geometria global do arco-cruzeiro, dos elementos envolventes e das pedras de cantaria que os compõem, e a distribuição das principais patologias diagnosticadas.

De entre as aberturas de junta detectadas na zona do arco-cruzeiro, as mais significativas correspondem à separação entre os dois arcos justapostos (intradorso e extradorso) que constituem o próprio arco triunfal, alguns deslocamentos relativos paralelos às juntas entre elementos de pedra destes arcos, e deformações em alguns elementos das paredes de alvenaria sobre o arco. A abertura de juntas entre os arcos de intradorso e extradorso tem como causa mais provável a deformação diferencial entre estes elementos, devida à distribuição de cargas que descarregam sobre estes, a fenómenos de fluência dos materiais e a possíveis assentamentos e deformações das paredes que dão apoio aos arcos. Esta separação entre arcos verifica-se ao longo de toda a sua extensão, embora com abertura de junta de dimensão variável ao longo do arco.



**Fig 3** - Localização das principais patologias verificadas no arco-cruzeiro.

A abertura de juntas entre elementos de pedra que compõe cada arco verifica-se com maior importância nas zonas de arranque dos arcos, provavelmente devido à insuficiente capacidade de reacção a esforços horizontais da estrutura nessa zona (ver figura 3). A abertura de juntas entre pedras na parede acima do arco é provavelmente consequência dos movimentos da estrutura do arco e dos seus apoios. Na parede do desvão foram observados os maiores deslocamentos relativos entre elementos de pedra, tanto em juntas verticais como em juntas horizontais, o que poderá estar relacionado com dois aspectos, por um lado com a grande amplitude térmica observada nesta zona, e por outro lado com o reduzido valor das tensões verticais nestes elementos. Nas figuras 4 e 5 são apresentados alguns exemplos dos danos observados, manifestados pela abertura de juntas. O escorregamento entre blocos de pedra consecutivos de cada arco (ver figura 6, à esquerda) observou-se principalmente em zonas onde é evidente a separação entre arcos (ver figura 6, à direita). Estes movimentos do arco justificam parcialmente os danos nas paredes de alvenaria acima do arco e no desvão, bem

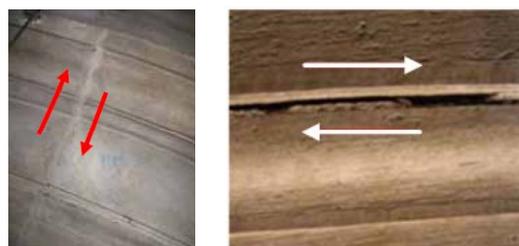
como a deformação dos elementos em consola que se apoiam no arco. As pedras centrais dos elementos em consola sobre o arco-cruzeiro indiciam um movimento de rotação (figura 7) que, como referido anteriormente, se associa aos restantes movimentos do arco. Por outro lado, a deformação excessiva dos elementos de parede sobre o arco também pode ter potenciado a redução de eficiência do encastramento das pedras em consola.



**Fig 4** – Abertura de junta entre o arco de intradorso e de extradorso



**Fig 5** – Abertura de junta entre pedras na parede sobre o arco (zona do desvão)



**Fig 6** – Escorregamento entre pedras do arco



**Fig 7** – Rotação dos elementos em consola

A partir da distribuição dos principais danos observados nas zonas de influência do arco e do tímpano é possível identificar a região mais fragilizada, correspondente a uma superfície, composta por fissuras e aberturas de juntas, que se desenvolve desde o coroamento do arco-cruzeiro até ao tímpano (ver figura 8).

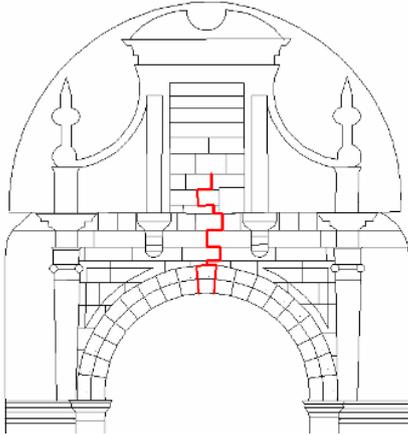


Fig 8 – Fragilização do arco-cruzeiro e tímpano

### 3–SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

#### 3.1 – Enquadramento

A monitorização de estruturas de Engenharia Civil tem como principal objectivo a obtenção de um registo contínuo, ou discreto, de grandezas e parâmetros que representam a resposta da estrutura (acelerações, deslocamentos, deformações, temperatura, entre outros). Em estruturas complexas, ou em estruturas cujo comportamento não esteja devidamente caracterizado, e para as quais haja a necessidade de proceder a intervenções de reparação, de reabilitação ou de reforço, a instalação de um sistema de monitorização pode fornecer dados essenciais para a elaboração do respectivo projecto. A observação estrutural, após qualquer uma destas intervenções, deve também ser desenvolvida com o objectivo de se analisar a eficiência das soluções projectadas e aplicadas em obra.

Para a monitorização da Igreja da Misericórdia foi adoptado um sistema de sensores de fibra óptica, que permite medir

uma determinada grandeza física por alteração de uma propriedade da luz propagada na fibra. Estes sensores apresentam diversas vantagens em relação aos sensores convencionais, nomeadamente: imunidade à interferência electromagnética, elevada gama dinâmica, boa relação sinal-ruído, dimensões reduzidas, possibilidade de multiplexagem de vários sensores numa única fibra e resistência à corrosão. Um sensor de fibra óptica, embebido ou ligado a uma estrutura, deve ser capaz de detectar modificações na mesma, de uma maneira precisa e fiável, durante todo o período em que se pretende desenvolver a monitorização.

#### 3.2 – Monitorização com redes de Bragg

Para a monitorização do arco da Igreja da Misericórdia recorreu-se à implementação de sensores de fibra óptica, nomeadamente à tecnologia de redes de Bragg, para a medição de deformações e temperatura. Os sensores foram desenvolvidos no Departamento de Física e no Instituto de Telecomunicações da UA [Antunes *et al.* (2009)].

Os sensores, bem como o sistema de fixação, foram testados em laboratório, e só depois se procedeu à sua instalação no arco-cruzeiro. Os vários sensores foram instalados de forma a monitorizar quer a abertura de juntas quer o deslocamento relativo de elementos de pedra paralelamente à junta. Nos pontos onde se pretende monitorizar a abertura de junta, o sensor é colocado perpendicularmente à junta. nos pontos onde se pretende monitorizar o deslocamento relativo entre elementos de pedra, o sensor é colocado paralelamente à junta (ver figura 9). Como os sensores de Bragg são altamente sensíveis às variações de temperatura [Barbosa *et al.* (2008), Majumber *et al.* (2008), Li *et al.* (2004)], os sinais registados nos sensores instalados para medição de deformação devem ser compensados dos efeitos da temperatura. Assim, foram instalados cinco sensores de temperatura, também em redes de Bragg, colocados estrategicamente a várias cotas por forma a registar a variação da temperatura em torno de cada sensor de deformação.



**Fig 9** – Fixação dos sensores para medição de abertura de junta e deslocamento relativo paralelo à junta.

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 10), sendo assim uma vantagem em aplicações neste tipo de monumentos.



**Fig 10** – Aspecto final do arco-cruzeiro após instalação do sistema de monitorização

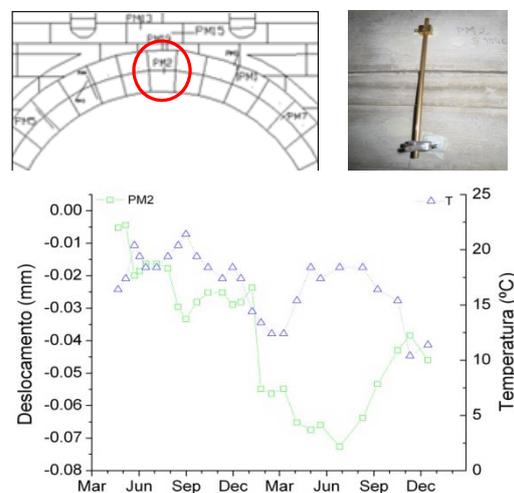
#### 4–RESULTADOS PRELIMINARES

Os resultados aqui apresentados referem-se aos primeiros vinte meses de monitorização, a partir da instalação de todo o sistema de aquisição de dados (Março de 2006 a Dezembro de 2007). Esta aquisição será desenvolvida por mais cinco anos, uma vez por mês. De seguida são apresentados os gráficos das medidas obtidas nos sensores, agrupados em função da sua disposição no arco-cruzeiro. Esta forma de apresentação dos resultados torna a leitura e interpretação dos dados mais objectiva e facilita a comparação entre os vários pontos de medida que monitorizam movimentos relativos com tendências relacionáveis. Cada ponto de monitorização (PM) tem um sensor com um objectivo específico, associado à informação que se pretende medir no ponto em que este é colocado, por exemplo abertura de junta entre arcos ou abertura de juntas na zona de

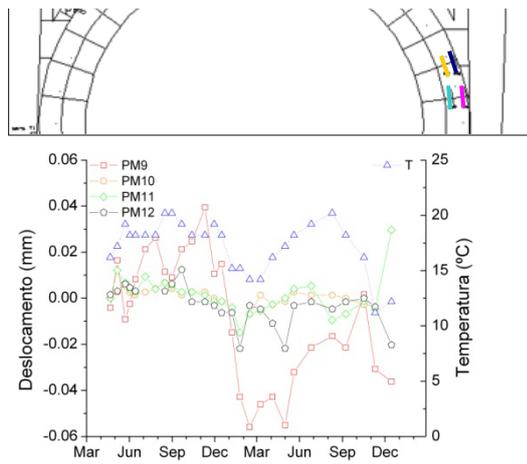
arranque dos arcos. Apesar de não ser apresentado nos gráficos que se seguem, é importante referir que foram feitas algumas medições discretas ao longo do dia, em dias representativos das solicitações climáticas extremas a que a estrutura está sujeita. Verificou-se, como era de esperar, que a reduzida variação de temperatura ao longo dia, experienciada por que este tipo de construções tem associadas reduzidas deformações, como se verificou nos vários pontos de medida. Na monitorização deste tipo de estruturas, os resultados podem ser conclusivos se existirem registos relativos a alguns anos. Assim, no período de aquisição de dados decorrido até à data, e pelas deformações registadas, é ainda prematuro retirar conclusões definitivas sobre a tendência dos movimentos estruturais e suas causas.

O ponto de monitorização PM2 (ver figura 11), que corresponde ao controlo da deformação relativa entre os elementos de coroamento dos dois arcos, apresenta uma tendência de abertura, embora sejam pequenos os movimentos observados nesta fase. Como referido anteriormente, a monitorização irá ser continuada para controlar a evolução da deformação, e servir de apoio à decisão sobre eventual necessidade futura de reforço da estrutura.

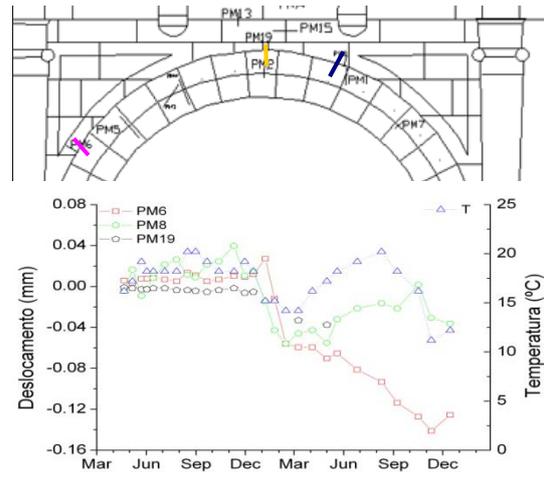
Na figura 12 são apresentadas as deformações medidas entre blocos contíguos de um mesmo arco, na zona de arran-



**Fig 11** – Ponto de monitorização PM2

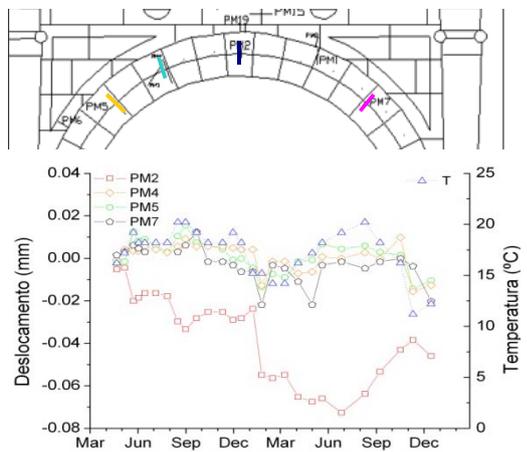


**Fig 12** – Pontos de monitorização PM9, PM10, PM11 e PM12



**Fig 14** – Pontos de monitorização PM6, PM8, PM19

que dos arcos. Os valores registados correspondem a deformações cíclicas reversíveis, com excepção dos deslocamentos relativos medidos no sensor PM9. Na figura 13 representa-se a evolução do movimento relativo entre arcos em 4 pontos de controlo, onde se registaram deformações irreversíveis, embora reduzidas, particularmente nos pontos de referência do lado direito do arco.



**Fig 13** – Pontos de monitorização PM2, PM4, PM5 e PM7

Na figura 14 observa-se a evolução do movimento relativo entre o arco de extradorso e a parede sobre este. As deformações intensificaram-se a partir de Janeiro de 2007, apesar de se referirem a valores reduzidos (deslocamento relativo máximo menor que uma décima de milímetro).

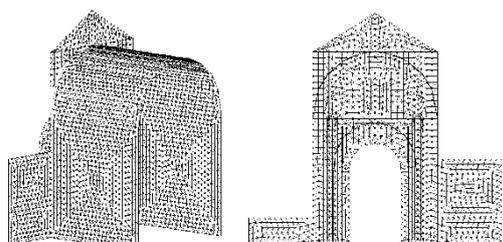
## 5-MODELO ESTRUTURAL

Para a compreensão do comportamento estrutural do arco-cruzeiro da Igreja da Misericórdia e da estrutura envolvente foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional no programa de elementos finitos CASTEM [CEA (1990)], no qual foram realizadas análises estáticas e dinâmicas, a partir da geometria da estrutura existente, das condições de apoio observadas e de propriedades mecânicas médias da alvenaria.

### 5.1 - Geometria da estrutura e malha de elementos finitos

Para a definição do modelo estrutural foi caracterizada 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. Na modelação da Igreja 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 da Igreja de Misericórdia foi obtida com base num levantamento topográfico rigoroso complementado com fotografias de alta resolução e visitas técnicas ao local. Uma vez que objectivo central deste estudo é a



**Fig 15** – Malha de elementos finitos adoptada no modelo numérico

compreensão do comportamento e interpretação dos danos observados no arco-cruzeiro da Igreja da Misericórdia, foi apenas modelado com detalhe o arco-cruzeiro e os elementos envolventes. Após várias iterações, adoptou-se a malha representada na figura 15, optimizando o tempo de cálculo e os erros numéricos associados. Na definição das condições fronteira consideraram-se apoios rígidos em todos os pontos da base das paredes, impedindo os deslocamentos nas três direcções independentes 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 seu comportamento quando submetida a solicitações de carácter estático ou 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 antiguidade das construções e ao seu estado de degradação, às técnicas de construção tradicionais e materiais utilizados, e à falta de documentação e estudos técnico-científicos nestas áreas [Varum e Rodrigues (2005)].

A pedra utilizada na construção do arco é do tipo Ançã. Da pesquisa bibliográfica realizada, foram adoptados para as propriedades mecânicas mais relevantes dos materiais em causa, os valores que se resumem na Tabela 1. No modelo estrutural desenvolvido foi considerado apenas um material-tipo,

admitindo um comportamento elástico, linear e isotrópico.

No que diz respeito às acções actuantes, foi considerado neste estudo apenas o peso próprio dos elementos de alvenaria e dos elementos decorativos existentes. Apesar das estruturas de alvenaria deste tipo terem tipicamente níveis de tensão instalada reduzidos, os danos e patologias estruturais surgem normalmente em elementos singulares com elevado nível de tensão, ou em elementos onde a tensão cresce como consequência de assentamentos de fundações ou deformação excessiva da própria estrutura pela acção do seu próprio peso.

**Tabela 1** – Propriedades da alvenaria de pedra adoptadas no modelo numérico

E (MPa)	$\nu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Tensão resistente (MPa)	
			Tracção	Comp.
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 do modelo numérico

Nesta secção apresentam-se os principais resultados da análise numérica realizada para a estrutura em estudo, em termos de tensões máximas e distribuição de deformações. Para a interpretação das causas prováveis dos danos observados na estrutura, comparou-se os resultados em termos de tensões principais máximas positivas ( $\sigma_1$ ) com os danos observados *in-situ*. Nas zonas onde se concentram tensões principais máximas positivas elevadas potencia-se o desenvolvimento de danos estruturais, nomeadamente a abertura de juntas entre blocos de pedra. Nas figuras 16 e 17 representa-se a distribuição das tensões principais máximas positivas, para a acção correspondente ao peso próprio, nos pontos onde é excedido o limite de resistência em tracção (ver tabela 1).

Na figura 18 confrontam-se os danos observados com os resultados da análise numérica, em termos de tensões principais máximas positivas. Como se pode observar, só com a acção do peso próprio da estrutu-

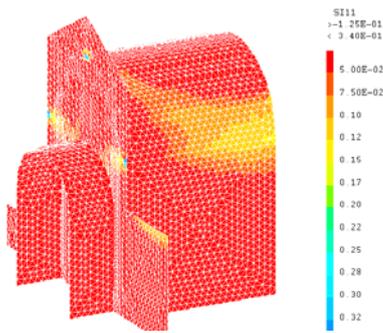


Fig 16 – Distribuição das tensões  $\sigma_1$  na estrutura

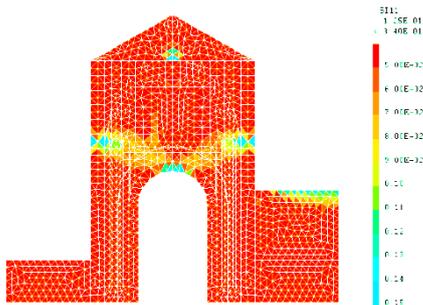


Fig 17 – Distribuição das tensões  $\sigma_1$  no arco e envolvente

ra surgem tensões de tracção elevadas, que ultrapassam o limite de resistência do material, e portanto justificam muitos dos danos observados. Com o plano de monitorização implementado será registada a evolução destes danos e a sua influência na estabilidade da estrutura.

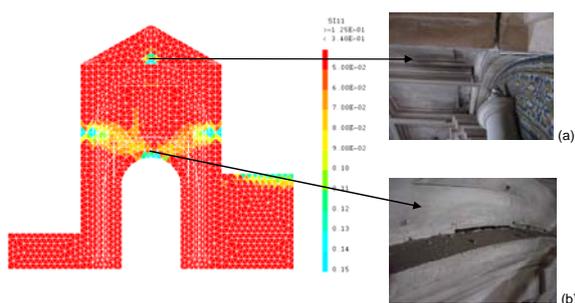


Fig 18 – Confronto entre os resultados obtidos com o modelo numérico e os danos observados

## 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho envolveu o levantamento das patologias, e o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de monitorização para os principais danos estruturais observados e a análise estrutural da zona de

influência do arco-cruzeiro da Igreja da Misericórdia de Aveiro. Dos dados registados durante os primeiros vinte meses é apenas possível concluir que as deformações registadas neste período são reduzidas. Este trabalho de monitorização será continuado por cinco anos, pretendendo-se obter informação que permita caracterizar rigorosamente o comportamento estrutural da zona em estudo. Por outro lado, o registo da evolução dos danos serve como sistema de alerta para uma eventual evolução dos danos que possa pôr em causa a estabilidade da estrutura.

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

## AGRADECIMENTOS

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da FCT. Os autores agradecem a contribuição da Eng.<sup>a</sup> Ana Valente e do Eng. Nuno Brandão por todo o trabalho desenvolvido no âmbito deste projecto.

## REFERÊNCIAS

- Antunes, P.F.C., Lima, H.F.T., Alberto, N.J., Rodrigues, H., Pinto, P.M.F., Pinto, J.L.; Nogueira, R.N.; Varum, H.; Costa, A.G. e André, P.S.B., Optical Fiber Accelerometer System for Structural Dynamic Monitoring, IEEE Sensors Journal, Vol. 9, N. 11, pp. 1347-1354, 2009
- Barbosa, C., Costa, N., Ferreira, L.A., Araújo, F.M., Varum, H., Costa, A., Fernandes, C. e Rodrigues, H., Weldable fibre Bragg grating sensors for steel bridge monitoring,

- Measurement Science & Technology, Vol. 19, Issue 12, 2008
- CEA, CASTEM 2000, Guide d'utilisation, CEA, França, 1990
- Costa, A. e Arêde, A., Conservação e Reabilitação do Património Edificado, 1<sup>as</sup> Jornadas Eng<sup>a</sup> Civil, UA, pág. 29-70, 2004
- 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, Aveiro, 2006
- Li, H.-N., Li, D.-S., Song, G.-B., Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering, Engineering Structures, Vol. 26, pág. 1647-1657, 2004
- Majumder, M., Gangopadhyay, T.K., Chakraborty, A.K., Dasgupta, K., Bhattacharya, D.K., Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-Present status and applications, Sensors and Actuators A, Vol. 147, pág. 150-164, 2008
- Valente, A. e Brandão, N., Caracterização e monitorização estrutural - Departamento de Eng. Civil da UA, Aveiro, Julho de 2006
- Varum, H. e Rodrigues, H., Avaliação do comportamento estrutural da torre medieval de Vilharigues, Vouzela, Cong. Métodos Num. Ing., Granada, 2005