

Avaliação da estabilidade do oculus sul da catedral de Cantuária



Nuno Mendes*

PhD
ISISE / UMinho
Guimarães
nunomendes@civil.umnh.pt



Paulo B. Lourenço

Professor Catedrático
ISISE / UMinho
Guimarães
pbl@civil.umnh.pt



Marios Filippoupolitis

Mestre em Engenharia
Civil
Universidade de
Liverpool
Reino Unido
m.filippoupolitis@liverp
ool.ac.uk



Claudio Corallo

Mestre em Engenharia
Civil
The Morton
Partnership
Reino Unido
claudio.corallo@themo
rtonpartnership.co.uk

SUMÁRIO

Esta publicação tem por objetivos verificar a estabilidade do oculus sul do transepto da Catedral de Cantuária do Reino Unido quando sujeito ação do vento, e estudar a influência da deterioração e da grelha exterior na sua capacidade de carga. O estudo incluiu a inspeção no local, ensaios de vibração ambiental para identificação das propriedades e a análise numérica. A análise não linear estática permitiu concluir que oculus apresenta um fator de segurança igual a dez quando sujeito à ação do vento.

Palavras-chave: Identificação dinâmica; análise não linear, estabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O oculo é uma janela circular de grandes dimensões e estilo romanesco, que se encontra dividida pela armação. Contrariamente às rosáceas que substituíram os oculus na segunda metade do século XIII e em que a fixação dos painéis de vidro é realizada através de uma armação em pedra rendilhada, a armação do oculo é construída em ferro forjado [1]. A Catedral da Cantuária tem um oculo em cada extremidade do transepto. O oculus sul da

Catedral foi construído entre 1178 e 1180 e é constituído por um vitral e uma grelha externa, ligados por barras na direção ortogonal.

A sua data de construção, as suas dimensões apreciáveis (4.47 m de diâmetro) e forma da armação do vitral fazem do oculus uma estrutura única. A sua construção foi eficaz e exemplar, uma vez que passados mais de 800 anos, exposto às condições ambientais, aos bombardeamentos da Segunda Guerra Mundial e ao quase colapso da empena sul, ainda encontra-se ainda utilização.

O oculus sul apresenta-se em bom estado de conservação, sobretudo tendo em consideração a sua idade. Verifica-se apenas a existência de algum dano localizado e alguma deterioração. Esta comunicação tem por objetivo verificar a estabilidade do oculus sul quando sujeito à ação do vento e avaliar a influência da deterioração e da grelha na sua capacidade de carga.

2. CATEDRAL DA CANTUÁRIA

2.1 Revisão da história da Catedral

O primeiro Arcebispo da Cantuária, Sto. Augustine, chegou como missionário a Inglaterra em 597 A.D. e cedo fundou a primeira Catedral [2]. Durante o período Anglo-Saxónico (597-1070) a história da construção da Catedral resume-se a quatro fases principais (Fig. 1a): (a) Igreja primitiva com uma abside e uma nave simples, na qual foram gradualmente adicionados alpendres na fachada Oeste, e alçados Norte e Sul; (b) Posteriormente, foi adicionado um batistério junto do cunhal Sudoeste e a 0.50 m para o interior da nave da igreja primitiva, tendo sido prolongado nos períodos subsequentes; (c) No século X foi realizado um alargamento significativo da Catedral, incorporando as arcadas no interior corredores laterais, e que envolveu também um alargamento das fundações, possivelmente para aumentar a altura das paredes. Além disso, a igreja e os corredores duplicaram o seu comprimento, devido à sua extensão para Oeste; (d) Extensão final para Oeste e reconstrução da extremidade Oeste da Catedral, adicionando um amplo narthex e as torres. A igreja e a maioria dos edifícios monásticos foram destruídos por um grande incêndio em 6 de dezembro de 1067.

Entre 1067 e 1077, o Arcebispo Lanfranc reconstruiu a Catedral com um estilo Normando (Fig. 1b). A torre foi posicionada no centro da igreja e construída sobre os quatro grandes pilares. A Oeste da torre fica localizada a nave da igreja com oito pilares em cada extremidade lateral e duas torres. À esquerda e à direita da torre central encontram-se dois transeptos. A meio de cada transepto existe um pilar, que tem por objetivo sustentar a abóbada.

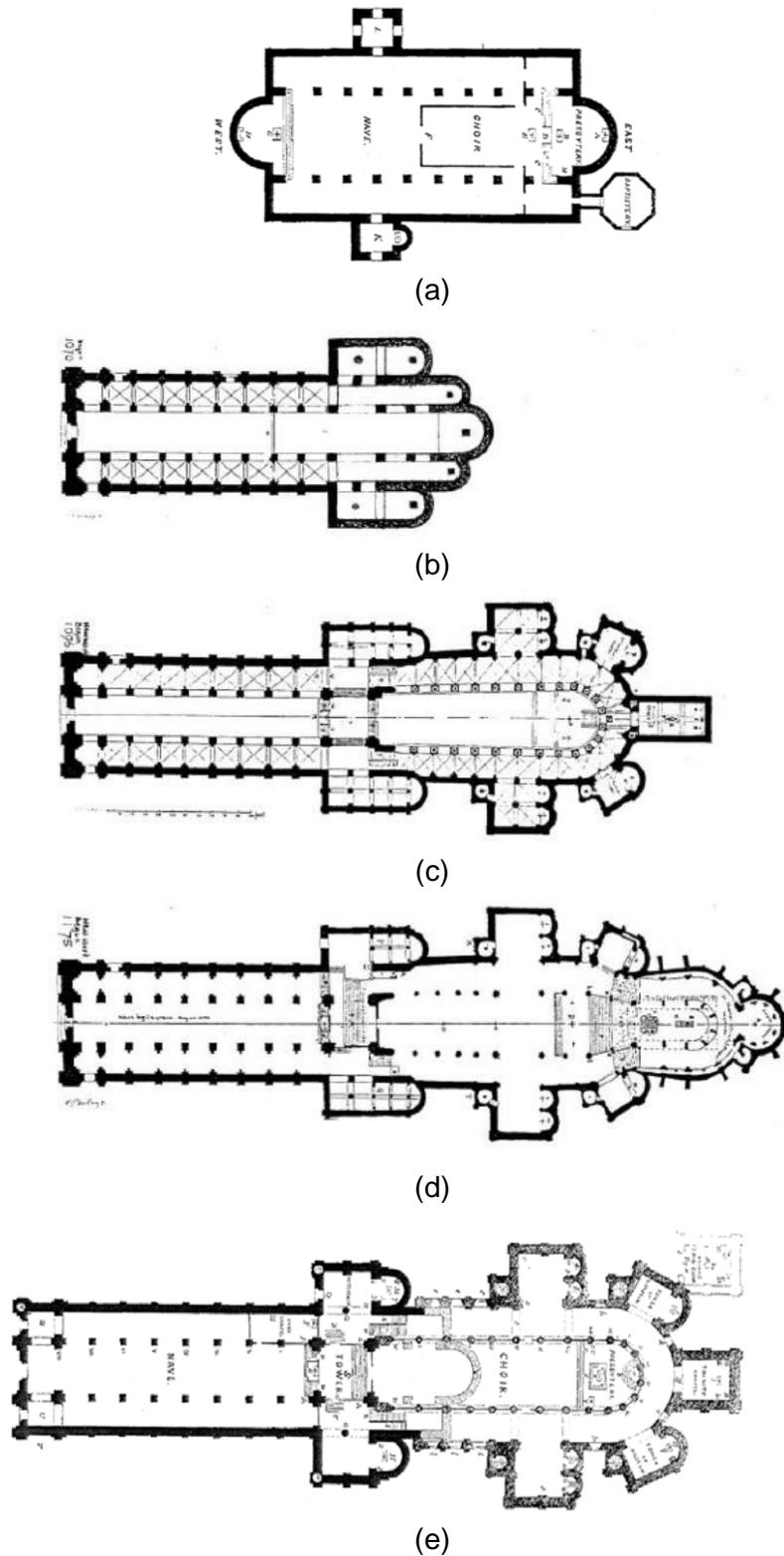
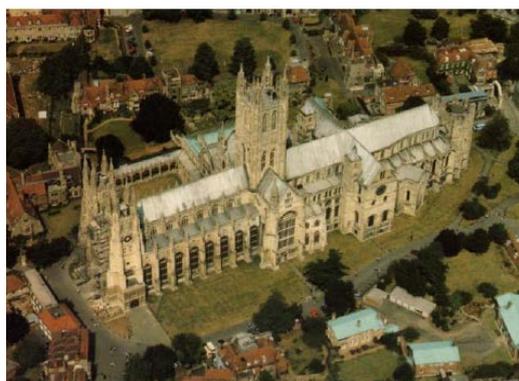


Figura 1. Planta da Catedral de Cantuária: (a) período Anglo-Saxónico; (b) Catedral do Arcebispo Lanfranc; (c) Catedral do Arcebispo Anselm; (d) Catedral do Arcebispo William de Sens; (e) Catedral após reconstrução da nave com estilo Gótico Inglês.

Após a morte do Arcebispo Lanfranc (1089), a cidade de Cantuária ficou sem arcebispo durante cinco anos e Anselm foi consagrado em 4 de dezembro de 1093. Em 1096, o Arcebispo Anselm iniciou a reconstrução do coro do Arcebispo Lanfranc. Enquanto o coro do Arcebispo Lanfranc tinha aumentado cerca de 21 m Este, o novo coro do Arcebispo Anselm aumentou cerca de 58 m para Oeste, com um aumento proporcional nas direções Norte e Sul (Fig. 1c). Devido às suas elevadas dimensões, a cripta foi totalmente reconstruída. A reconstrução da cripta terminou em 1130 e corresponde à cripta de abóbadas existente atualmente. O coro do Arcebispo Anselm foi novamente destruído por um incêndio em 1174. Nos anos seguintes ao incêndio, William de Sens iniciou a construção de um terceiro coro. Foram construídos trifórios e clerestórios, tendo por objetivo reduzir as cargas provenientes dos níveis superiores que atuam nas paredes de alvenaria antiga. O novo cor tinha dimensões semelhantes ao anterior e um novo estilo arquitetónico, correspondente ao século XIII (Fig. 1d). Em 1378, o Arcebispo Sudbury demoliu a nave do Arcebispo de Lanfranc, tendo por objetivo reconstruí-la. No entanto, o Arcebispo Sudbury faleceu em 1381, impedindo-o de concretizar o seu objetivo. A reconstrução da nave foi realizada pelo Prior Thomas Chillenden (1390 -1411), que lhe atribui um estilo Gótico Inglês e existente atualmente (Fig. 1e). Em 1498, a torre sineira Harry (torre situada entre a nave e o coro) foi ampliada e a Catedral foi em grande parte finalizada tal como existe atualmente. Por último, a torre original Noroeste, de estilo Normando, foi demolida no final do século XVIII, devido a problemas estruturais. A torre foi substituída em 1830 como uma torre gémea da torre Sudoeste e correntemente identificada por torre Arundel. Esta foi a alteração estrutural mais importante realizada na Catedral (Fig. 2).



(a)



(b)

Figura 2. Catedral de Cantuária: (a) após a alteração mais significativa (1830);
(b) atualmente.

2.2 Trabalhos recentes de restauro

As paredes da Catedral da Cantuária são constituídos por três panos de alvenaria. Os dois panos exteriores são construídos com unidades de pedra de Caen (calcário com origem na cidade Francesa de Caen) e apresentam unidades de pedra de maiores dimensões de

travamentos dos panos. O pano de interior de enchimento encontra-se preenchido com argamassa à base de cal e pedras irregulares de menores dimensões [3].

Acredita-se que o intenso bombardeamento durante a Segunda Guerra Mundial poderá ter tido influência na separação do pano exterior das paredes. Este tipo de dano na seção transversal das paredes pode ser grave para a estabilidade do edifício, podendo ser ainda mais grave quando associado a infiltrações das águas pluviais e a temperaturas muito baixas [3]. Harold Anderson (responsável pela conservação e restauro da Catedral entre 1946 e 1968) realizou uma intervenção na Catedral que consistiu na aplicação de argamassa com base em cimento Portland de alta resistência nas paredes de alvenaria, tendo por objetivos reestabelecer a integridade das paredes e aumentar a sua resistência. Contrariamente ao previsto, o uso de argamassa à base de cimento Portland teve consequência negativa para as paredes de alvenaria de calcário, acelerando a sua deterioração nas zonas em que foi utilizado. Além disso, Anderson reparou a torre sineira Harry recorrendo a unidades de calcário de Bath [3].

Em 1968, Peter Marsh tornou-se responsável pela conservação e restauro da Catedral da Cantuária e tentou novamente utilizar unidades de calcário do norte de França. No entanto, foi impossível obter unidades de pedra de Caen na quantidade e qualidade pretendida desde o final do século XIX. Peter Marsh encontrou calcário de elevada qualidade no sudoeste de França, conhecido como *Lepine*, e realizou as seguintes intervenções [3]: (a) reconstrução da empena do transepto sudoeste. Recorreu-se a uma viga de betão armado em consola para transferir o peso próprio da empena para a estrutura principal do edifício; (b) restauro dos vidros do vitral sul. Após restauro dos vidros, o vitral foi colocado de volta na Catedral com armações em bronze e uma folha de vidro protetora no exterior; (c) reparações de grande envergadura na extremidade oeste da Catedral, incluindo reconstrução do oculus, da empena, e substituição de unidades de pedra a sudoeste e noroeste das torres.

Em 1991, John Burton tornou-se o novo responsável pela conservação e restauro da Catedral da Cantuária e os seus principais projetos foram [3]: (a) intervenção do piso da nave e do transepto sudoeste da Catedral. Foi colocada uma nova laje de betão sobre a betonilha com agregados calcários e o sistema de aquecimento do piso; (b) programa de limpeza dos elementos originais da Catedral, tendo por objetivo remover a camada exterior escura que aumenta a degradação e altera a cor da pedra; (c) implementação de um sistema de monitorização na Catedral para controlo de temperatura, humidade relativa e deformações; (d) John Burton encontrou uma mina de pequenas dimensões próxima da cidade Francesa de Caen onde a extração das pedras calcário do tipo Caen foi reestabelecida. Foram realizados vários ensaios que permitiram concluir que este tipo de pedra corresponde à pedra utilizada na construção original da Catedral. A primeira unidade de pedra de Caen utilizada no restauro na Catedral foi aplicada em 2009 na reconstrução dos pináculos situados no topo da capela corona.

2.3 Oculus sul

A catedral da Cantuária tem duas janelas oculares (oculus), designadas como “olhos”, situadas nas fachadas norte e sul do transepto (Fig. 3). Os oculus são janelas circulares de grandes dimensões e com estilo romanesco. Contrariamente às rosáceas, em que a fixação dos painéis de vidro é realizada através de uma armação de pedra rendilhada, os oculus apresentam-se divididos em segmentos por armações de ferro. Os oculus são elementos únicos devido à sua data de construção, dimensões elevadas e construção da armação principal. Os dois oculus da Catedral da Cantuária são decorados com painéis de vidro coloridos. O oculus norte apresenta-se decorado com imagens do Antigo Testamento e mantém vários painéis de vidro originais. O oculus sul encontra-se decorado com imagens representativas do Novo Testamento e apresenta apenas doze painéis de vidro originais. Os restantes painéis de vidro do oculus sul foram reconstruídos por George Austin (responsável pelos painéis de vidro da Catedral entre 1848 e 1862) [4].

O oculus sul, construído entre 1178 e 1180, é uma janela circular e é constituído pelo vitral e a grelha exterior. O vitral é constituído pela armação em ferro forjado. Apesar data de construção, o ferro da armação do oculus encontra-se em bom estado de conservação. A armação é constituída pela armação principal, que tem por objetivo garantir a estabilidade do oculus, e por armações secundárias, que têm como função suportar os painéis de vidro (Fig. 4a). Os painéis de vidro encontram-se ligados às armaduras secundárias através de uma sistema de ligação com cunhas de fácil montagem e desmontagem do painéis de vidro (Fig. 4b). A grelha externa é composta por dois conjuntos de barras verticais e horizontais com seção circular (Fig. 4b). As barras verticais apresentam aumento da seção transversal nas interseções com as barras horizontais, permitindo que estas passem pelo interior das barras verticais. A interseção das barras verticais com as barras horizontais da grelha apresenta ainda cunhas de cobre. As juntas encontram-se seladas com massa de chumbo (Fig. 4d). A armação principal e a grelha encontram-se ligadas de barras em ferro de seção circular. A extremidade destas barras têm a forma de um olho circular e está ligada às barras da grelha exterior com recurso a cunhas. As juntas desta ligação são igualmente seladas com massa de chumbo (Fig. 4e). A outra extremidade da barra atravessa a armação principal e é martelada por forma garantir uma ligação tipo rebite [1]. O comprimento destas barras metálicas varia entre os 130 a 150 mm, correspondendo à distância entre o vitral e a grelha exterior. A armação principal encontra-se ligada à parede de alvenaria, como demonstrado na Fig. 4f. A grelha do oculus sul corresponde muito provavelmente à construção original (cerca de 1180), uma vez que as marcas das barras metálicas de ligação entre a armação e a grelha existentes no oculus norte apresentam uma distribuição igual às barras existentes no oculus sul, indicando que a grelha exterior de reforço foi aplicada na mesma época em ambos os oculus [4].



Figura 3. Oculus: (a) sul (antes do restauro); (b) norte (depois do restauro).

3. INSPEÇÃO E ENSAIO DE VIBRAÇÃO

3.1 Inspeção visual e levantamento da geometria

Apesar dos seus cerca de 835 anos, a armação do oculus sul apresenta-se, em geral, em bom estado de conservação, não se detetando alterações significativas relativamente sua forma original e apresentando dano ligeiro. À exceção de uma zona com interrupção total da secção transversal (Fig. 5a), os elementos da armação não apresentam dano significativo. Existem reparações antigas em alguns elementos (Fig. 5b), no entanto parecem afetar a estabilidade da armação. Além disso, regista ainda a presença de corrosão estabilizada nos elementos da armação. Devido à exposição ambiental e à data de construção da armação, considera-se que corrosão existente é reduzida. As ligações da armação apresentam-se em muito bom estado de conservação. Os elementos da armação apresentam secção transversal retangular. As dimensões das secções transversais foram medidas com recurso a um paquímetro digital e variam entre os 3 e os 7 cm [5].

A grelha exterior do oculus sul apresenta maior dano e deformação do que a armação, no qual se destaca o espaçamento variável entre barras. A terceira barra vertical a partir da esquerda apresenta dano severo com interrupção total da secção transversal (Fig. 6a). Algumas das barras foram apresentadas reparações com recurso a barras tubulares de secção transversal (Fig. 6b). Estas reparações devem ser removidas, uma vez que introduzem corrosão na grelha [6]. A secção transversal das barras não é perfeitamente circular e foram igualmente medidas em dois eixos ortogonais. O diâmetro médio da secção transversal das barras é igual a 24 mm [5].



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4. Pormenores da armação de ferro: (a) juntas da armação secundária; (b) sistema de fixação dos painéis de vidro na armação (imagem de outra janela); (c) grelha exterior com barras de seção circular; (d) cunha utilizada na ligação entra as barras da grelha exterior; (e) elementos metálicos de ligação da armação principal à grelha exterior; (f) fixação da armação principal à parede de alvenaria.



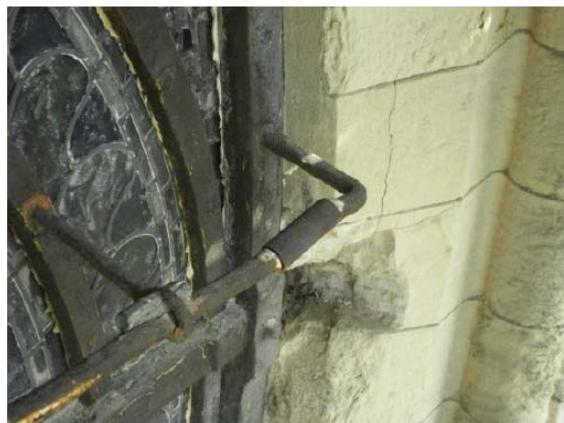
Figura 5. Inspeção visual da armação: (a) dano com interrupção total da secção transversal; (b) reparação antiga na anel circular.

A maioria dos barras de ligação entre a armação e a grelha apresentam formas geométricas semelhantes, com a exceção dos elementos que se apresentam fortemente deteriorados ou com que foram substituídos (Fig. 7). Estes elementos correspondem aos elementos mais deteriorados do oculus sul, apresentando reduções significativas de secção transversal junto da ligação com a armação na maioria dos elementos de ligação. A armação apresenta marcas que demonstram que faltam grande parte das barras originais de ligação entre a armação e a grelha. Além disso, foi destruído o “olho” de várias barras de ligação, tornando-as inativas. Este dano está possivelmente associado a reações eletroquímicas entre o ferro das barras de ligação e o ferro da armação e grelha. As ligações estas barras e a armação (rebites a frio) apresentam-se em boas condições de conservação. Todas as ligações entres estas barras e a grelha foram inspecionadas, identificando-se dano nesta ligação devido à deterioração, perda de cunhas e de massa de chumbo. Tendo em consideração este dano, consideraram-se inativas nove barras de ligação entre a grelha e a armação (Fig. 8a). As secções transversais destas barras não são constantes e, conseqüentemente, o diâmetro de cada barra foi medido em três pontos ao longo do seu eixo (dois nas extremidades e um no centro da barra). Além disso, em cada ponto da barra foram efetuadas duas medidas do diâmetro, nomeadamente uma medição na vertical e uma medição da horizontal. Devido a limitações relacionadas com tempo disponível para se efetuarem a inspeção e levantamento da geometria, foram medidas 45 secções, num total 71 secções. O diâmetro das barras de ligação entre a armação e a grelha varia entre os 9 e os 21 mm [5]. Tendo em consideração os resultados obtidos, estas barras foram classificadas de acordo com dois grupos (Fig. 8b): (a) barras com diâmetro superior a 15 mm na ligação com a armação e com secção constante determinada através da média das medições efetuadas nos três pontos da barra; (b) barras com secção transversal variável, considerando-se diâmetros diferentes para as partes deterioradas e não deteriorada [5].

Por último, a ligação da armação com a parede de alvenaria é efetuada com recurso a 16 pontos, nomeadamente 4 pontos da armação (2 verticais e 2 horizontais), 4 pontos das diagonais e 8 pontos entre os pontos anteriores [5]. Em geral, a alvenaria apresenta-se em muito bom estado de conservação, com exceção de um ponto de ancoragem, no qual se verifica o destacamento da alvenaria.



(a)



(b)

Figura 6. Inspeção visual da grelha: (a) dano com interrupção total da seção transversal; (b) reparação antiga.



(a)



(b)

Figura 7. Inspeção visual das barras metálica de ligação entre a armação e a grelha: (a) elemento recentemente aplicado; (b) deterioração dos elementos antigos.

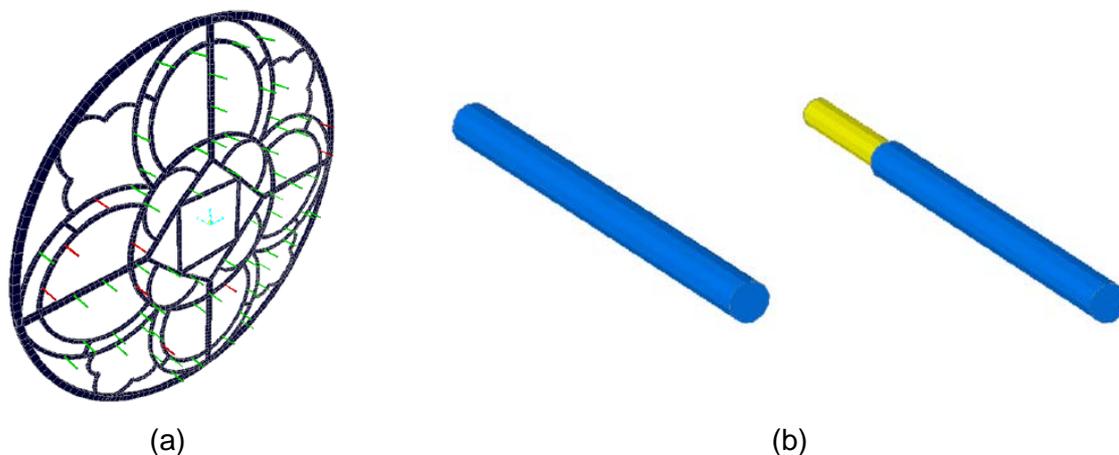


Figura 8. Pormenores das barras metálica de ligação entre a armação e a grelha: (a) elementos ativos (verde) e inativos (vermelho); (b) tipos de elementos considerados.

3.2 Ensaios de vibração ambiental

Os ensaios de vibração ambiental tem por objetivo identificar as propriedades dinâmicas do oculus (frequências, modos de vibração e coeficientes de amortecimento) e foram realizados com recurso a 4 acelerómetros piezoelétricos com domínio em frequência entre os 0.15 e 1000 Hz, valor de pico igual a ± 0.5 g e sensibilidade igual a 10 V/g. Foi ainda utilizado um sistema de aquisição de sinais com 24-bit de resolução. Foram colocados acelerómetros na armação (Fig. 9a) e na grelha. Na totalidade, foram medidas acelerações em 18 pontos do oculus, considerando 14 configurações de ensaios com 2 pontos de referência. Os sinais de aceleração foram adquiridos com uma frequência de amostragem igual a 200 Hz e com duração de 10 min. Foi utilizada a técnica de identificação modal “*Unweight Principal Component (UPC)*”, implementado do programa *ARTEMIS Extractor Pro* [7], para estimar as propriedades modais do oculus. A técnica UPC é baseada no método SSI (*Stochastic Subspace Identification*). A amplitude dos sinais de aceleração medidos é inferior a 6 mg.

A Fig. 9b apresenta o diagrama de identificação dos modos, no qual verifica-se que existem quatro modos com polos estáveis em todas as configurações de ensaios até os 17 Hz. A identificação de modos partir dos 17 Hz apresenta maior dificuldade. No entanto, foram identificados 10 modos de vibração com frequências entre os 10 e os 25 Hz [5]. Os seis primeiros modos identificados são modos globais do oculus e têm curvatura simples ou dupla. Os restantes modos identificados apresentam configurações modais mais complexas.

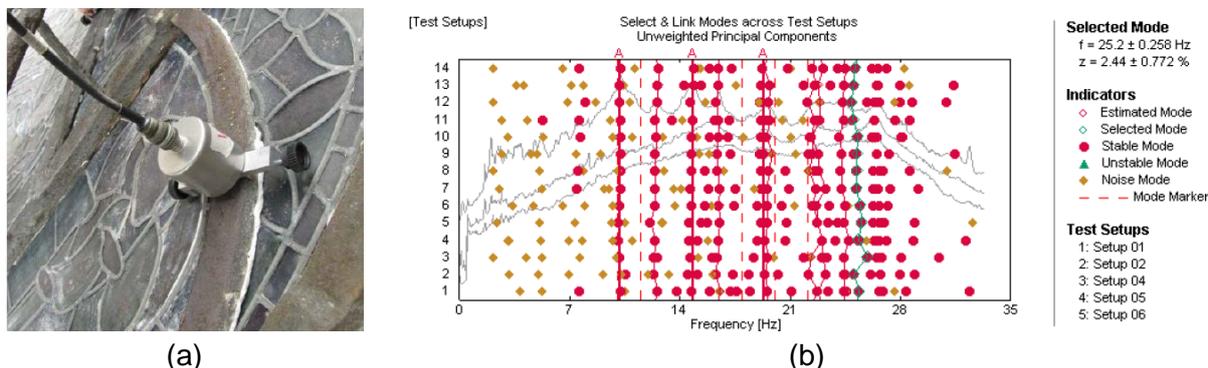


Figura 9. Ensaios de vibração ambiental: (a) acelerómetro colocado na armação; (b) diagrama de identificação dos modos.

4. ANÁLISE ESTRUTURAL

4.1 Preparação e calibração do modelo numérico

Foram preparados seis modelos numéricos no programa baseado no Método dos Elementos Finitos DIANA [8]. As frequências e modos de vibração de cada modelo foram calculados e comparados com os resultados experimentais obtidos nos ensaios de vibração ambiental, tendo por objetivo obter o modelo que melhor se aproxima do comportamento do oculus. Nos modelos numéricos consideraram-se diferentes opções para a geometria, ligações entre as barras e condições de fronteira [5]. Seguidamente, apresenta-se o modelo numérico final que melhor se aproxima das propriedades dinâmicas do oculus.

O modelo numérico final é constituído pelas barras da armação, grelha exterior e barras de ligação entre a armação e a grelha (Fig. 10a). As barras foram simuladas através de elementos de viga curvos de três nós CL18B. Este tipo de elemento corresponde a um elemento tridimensional de viga baseado na teoria de Mindlin-Reissner, a qual tem em consideração a deformação por corte. O modelo não considera elementos para simulação dos painéis de vidro. A ligação semirrígida entre a grelha e as barras de ligação armação/grelha e ligação entre as barras horizontais e verticais da grelha foram simuladas com recurso a elementos de mola. Neste modelo considerou-se que o oculus está perfeitamente ligado à parede de alvenaria em 16 pontos. As propriedades materiais do ferro utilizados no modelo numérico foram obtidas com recurso à bibliografia especializada [9]. A malha de elementos finitos tem 2278 nós e 1648 elementos, entre os quais 381 são elementos de mola.

As dez primeiras frequências do modelo numérico varia entre os 9 e os 29 Hz, aproximando dos resultados experimentais. O erro médio das frequências dos três primeiros modos de vibração é igual a 12% e os valores de MAC (*Modal Assurance Criteria*) são, respetivamente, iguais a 0.94, 0.66 e 0.61 (Fig.s 10b e 10c).

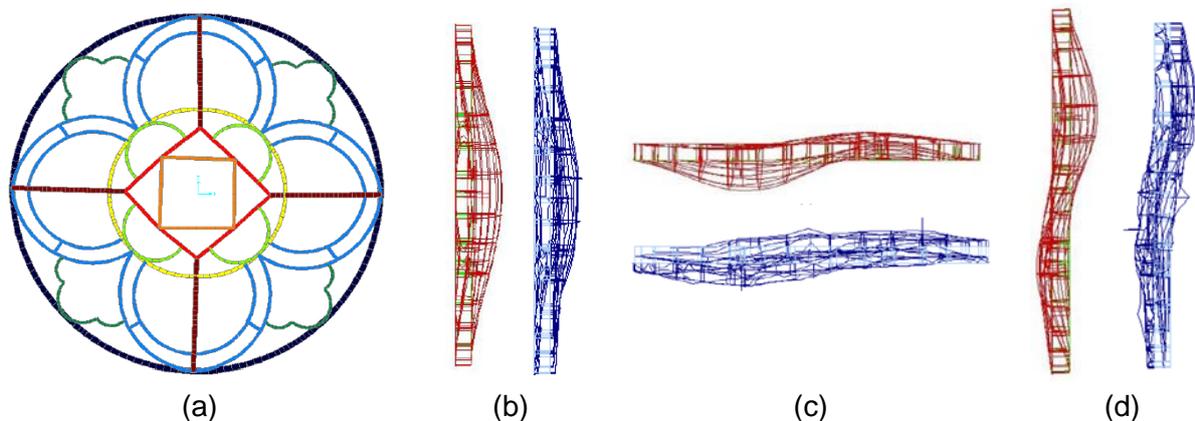


Figura 10. Modelo numérico: (a) diferentes seções transversais da armação; (b) 1º modo de vibração; (c) 2º modo de vibração; (d) 3º modo de vibração.

(vermelho: numérico; azul: experimental)

4.2 Avaliação da estabilidade

A análise estrutural do oculus sul da Catedral da Cantuária foi realizada tendo por objetivo a verificação da sua estabilidade estrutural para a ação do vento. Os resultados das análises não-lineares estáticas foram comparados com os critérios de projeto presentes no Eurocódigo 1, tendo sido determinados os respetivos fatores de carga. Foi efetuada uma análise paramétrica, tendo por objetivo avaliar a influência da grelha exterior, do dano existente e futura deterioração na estabilidade da estrutura. A pressão causada pela ação do vento determinada é igual a 1.19 kN/m^2 . No comportamento material do ferro considerou-se um diagrama elasto-plástico com tensão de cedência igual a 180 MPa e extensões de cedência e última de acordo com [9].

A Fig. 11 apresenta a variação do deslocamento horizontal no ponto central da armação em função do fator de carga aplicado. A estrutura entra em regime plástico para um fator de carga igual a 12.1 (“Existing”), ou seja, para uma ação do vento igual a 12.1 kN/m^2 . Tendo em consideração o valor proposto pelo Eurocódigo 1 (1.19 kN/m^2), o fator de segurança é igual 10.2. Note-se que a estrutura apresenta deslocamento elevados no final das análises. A Fig. 12a apresenta as deformações da estrutura no colapso. A cor vermelha corresponde a secções em que a tensão instalada é igual ou superior à tensão de cedência. A plastificação concentra-se nas barras da grelha exterior (verticais e horizontais) e na parte deteriorada das barras de ligação armação/grelha.

Seguidamente, efetuou-se o estudo parâmetro com diferentes considerações. Primeiramente, considerou-se a estrutura original (“Original”) imediatamente após a sua construção e sem deterioração. A Fig. 11 demonstra que para esta condição o fator é igual a 14.2 (+17%), o que revela que a deterioração tem uma influência moderada do comportamento da estrutura. Posteriormente, a grelha e as barras de ligação armação/grelha foram removidas do modelo numérico (“No Grille”), tendo por objetivo

avaliar apenas o comportamento da armação. O fator de carga para esta nova condição é igual a 8.04 (-34%), demonstrando que a grelha tem uma contribuição significativa para o fator de carga. Foi ainda estudada a influência de progressão da deterioração dos elementos do oculus, assumindo-se uma redução da seção transversal de 50% das seções já deterioradas e de 25% nas seções em bom estado de conservação (“Gen. Decay”). Para esta condição o fator de carga é igual a 5.01 (-59%), correspondendo a um valor moderado do fator de segurança da estrutura (4.2), no entanto ainda superior ao exigido pelos regulamentos. Por último, considerou-se o progresso da deterioração apenas nas barras de ligação entre a armação e a grelha exterior. Avaliou-se três hipóteses com redução de 25, 50 e 75 % das seções transversais destes elementos. Verifica-se que a progressão da deterioração nas barras de ligação armação/grelha tem uma menor influência do comportamento do oculus.

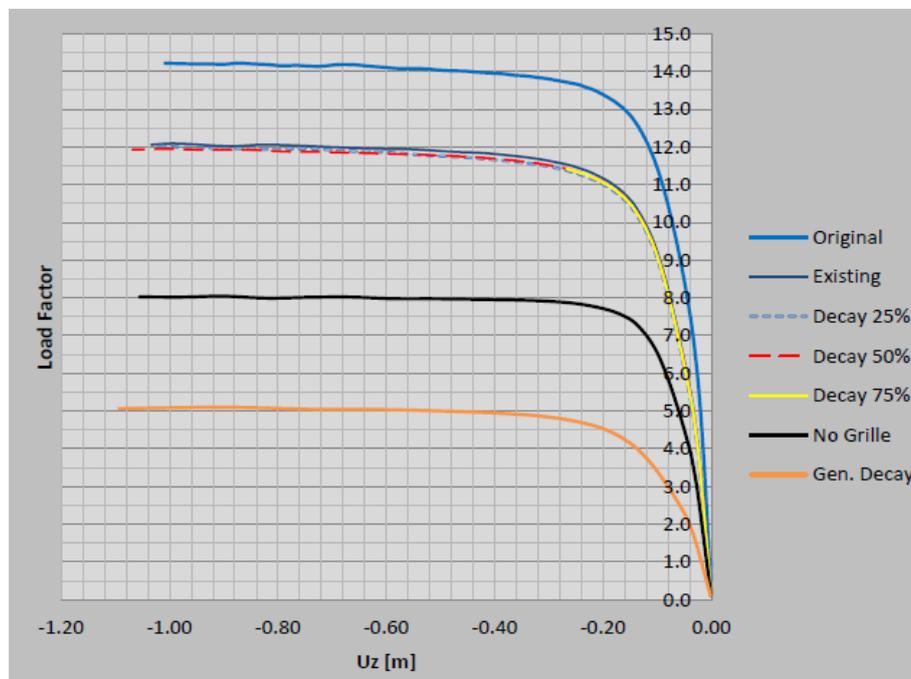


Figura 11. Curvas de capacidade do oculus.

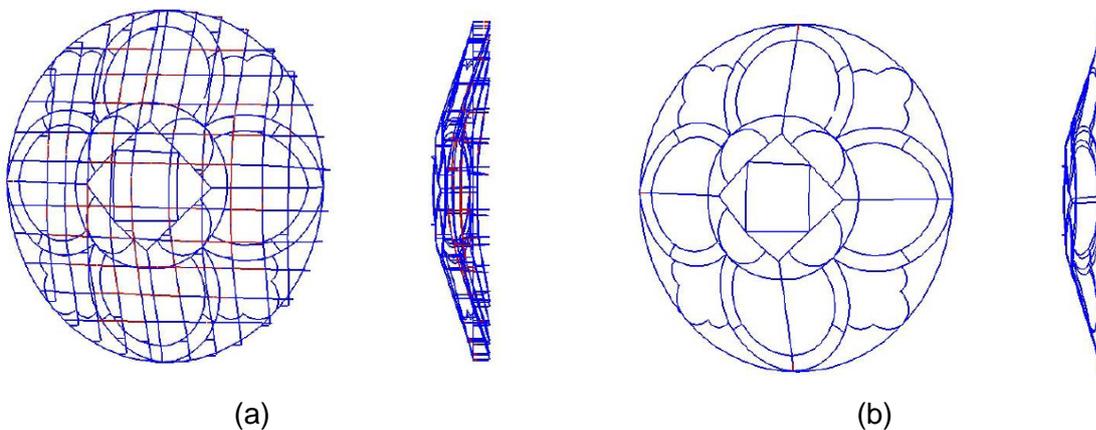


Figura 12. Dano: (a) oculus com armação e grelha exterior; (b) oculus sem grelha exterior.

5. CONCLUSÕES

O estudo realizado sobre o oculus sul da Catedral da Cantuária permite concluir o seguinte: (a) a armação e a grelha externa apresentam-se em bom estado de conservação; (b) as barras de ligação armação/grelha apresentam-se parcialmente deterioradas, com quebras, substituições e redução de seção transversal; (c) o fator de segurança do oculus com grelha e com considerando a deterioração existente quando sujeito à ação do vento é igual a dez; (d) a deterioração existente não influencia significativamente o comportamento do oculus; (e) a grelha externa tem uma contribuição significativa na capacidade de carga da estrutura, uma vez que o fator de carga do modelo sem grelha reduz para cerca de um terço do valor inicial; (f) a progressão da deterioração das barras que já apresentam deterioração tem pequeno impacto no comportamento da estrutura, devido à sua redundância.

REFERÊNCIAS

- [1] Ballio, G.; Mazzolani, F.M. – *Theory and Design of Steel Structures*. Chapman and Hall, 1983, 632 p.
- [2] Collison, P.; Ramsay, N.; Sparks, M. – “A History of the Canterbury Cathedral”, The Chapter of Canterbury Cathedral, 2002.
- [3] Newton, H. – “Stone repair and conservation after 1945”, in *The Architecture of Canterbury Cathedral*, by J Foyle. London: Scala Publishers, 2012.
- [4] Vidimus on Line Magazine. 2014. www.vidimus.org
- [5] Filippopolitis, M. – “The South Oculus at Canterbury Cathedral”, MSc Dissertation, 2011, Universidade do Minho, Guimarães.
- [6] Hall, B. – “Canterbury Cathedral, South Oculus, Cleaning Trials”, London: Hall Conservation LTD, 2011.
- [7] ARTeMIS User's Manual - Structural Vibration Solutions A/S, Release 5.3, Autocad User's Manua, Autodesk, Release 2010.
- [8] DIANA User's Manual, TNO DIANA BV, Release 9.4, 2009.
- [9] Bussell, M. – “Appraisal of Existing Iron and Steel Structures”, Berkshire: The Steel Construction Institute, 1997.