

8

MC  
Ministério da Cultura

ippar

ISSN 1645-2453

2005

PVP  
14,00€

# PATRIMÓNIO estudos



INTERVENÇÕES  
EM PATRIMÓNIO

# Reforço estrutural das torres da Sé do Porto

**Paulo B. Lourenço**

Engenheiro Civil,  
Doutor em Engenharia Civil  
Universidade do Minho,  
Departamento de Engenharia Civil  
pbl@civil.uminho.pt

A construção de torres, fosse qual fosse o pendor do seu destino, mais simbólico ou funcional, configurou-se muitas vezes como um desafio aos limites do conhecimento sobre estabilidade estrutural. A concretização do desejo de construir tão alto quanto possível coube, no passado, a mestres construtores que não detinham ferramentas de cálculo, tal como hoje cientificamente nos é possível, para resolver a equação entre a altura e a diminuição de segurança intrínseca. É sintomático, a exemplo do referido, que boa parte das torres representadas na documentação iconográfica sobre as cidades de Pavia e Bolonha, na Itália, já não existam: por colapso estrutural, associado à acção de fenómenos naturais, como raios e terremotos, ou por demolição, tomada como medida preventiva face ao receio de que o colapso viesse a acontecer. Aliás, ainda na história recente do mesmo país se salientaram os casos do campanário de São Marcos, em Veneza, com colapso em 1902, e a torre cívica de Pavia, em 1989. No primeiro caso a derrocada foi gradual, tendo decorrido dois dias desde o primeiro alarme e vinte minutos após a queda dos primeiros tijolos. No segundo, a ruína ocorreu sem aviso e em poucos segundos, tendo causado, inclusivamente, perdas humanas. Ainda que a alvenaria de tijolo e argamassa de cal, constituinte mais corrente da construção tradicional em Itália, apresente em geral fracas qualidades mecânicas, o caso recente do colapso da torre sineira da igreja de Goch, na Alemanha, em 1993, é exemplo de que a segurança das torres não é um problema exclusivo da tipologia construtiva de uma região. Interessará sobretudo extrair à laia de conclusão que, se a ruptura destas estruturas se der por efeitos de compressão excessiva, pode não ser emitido aviso prévio.

O colapso de torres de alvenaria exclui, em geral, a possibilidade de comportamento dúctil uma vez que

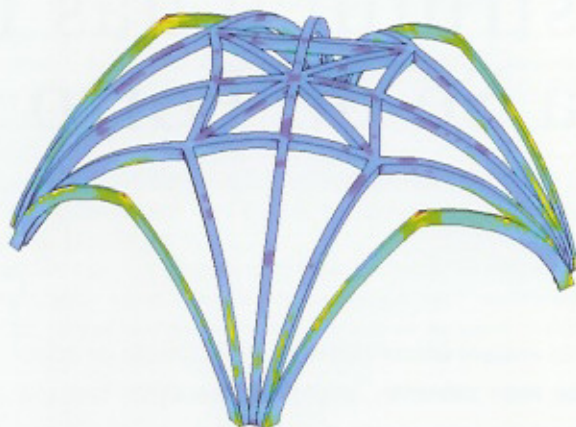
não existem possibilidades de redistribuição de esforços entre diferentes secções críticas. Desta forma, a ruína de uma secção é, habitualmente, suficiente para conduzir ao colapso total da construção. Este comportamento, associado ao risco estrutural elevado devido à natureza intrínseca das torres (a sua altura conduz a cargas verticais muito significativas e a tensões elevadas na base), deveria ter provavelmente como consequência uma margem de segurança mais elevada nestas construções do que a margem de segurança que se encontra nas estruturas antigas correntes. Obviamente que não se justifica uma postura excessivamente alarmista, mas entende-se que o elevado risco destas construções justifica estudos aprofundados e intervenções particularmente cuidadas nas situações em que existam dúvidas sobre o seu comportamento e, em especial, quando se trata de torres particularmente altas.

A altura total das torres da Sé do Porto é de cerca de 35 m, o que representa um valor médio para altura de torres e conduzirá a uma tensão vertical média instalada de cerca de 1.0 MPa. Este valor é relativamente baixo para cantaria de granito mas é francamente elevado para pedra irregular com juntas espessas de argamassa ou alvenaria irregular de pedra com junta seca, sendo moderadamente elevado para a constituição habitual das paredes de alvenaria de três panos, com dois panos exteriores de melhor qualidade e um miolo interior com enchimento solto ou saibro.

## Sobre as possibilidades modernas de diagnóstico e análise

Na última década observou-se um avanço muito significativo nas técnicas experimentais e numéricas para diagnóstico e análise, estando disponíveis recomendações recentes para intervenções em estruturas antigas<sup>1</sup>. Porém, face a uma estrutura antiga, o

1. Modelo em computador das nervuras do lanternim (as zonas a vermelho indicam a localização de fendas)



entendimento do passado e do presente é sempre difícil pela quantidade de variáveis a conjugar entre si e pela incógnita que muitas vezes reveste parte das mesmas: a complexidade da geometria e a definição dos elementos estruturais, a constituição interna destes últimos, a caracterização das propriedades mecânicas e a variabilidade das mesmas, as alterações episódicas e o faseamento evolutivo da construção ao longo do tempo, os danos ocorridos no passado e ainda a reduzida normativa aplicável.

Na Sé foram aplicadas ferramentas de análise estrutural avançada na construção dos modelos adoptados para a Capela de São Vicente e para o lanternim do transepto (Fig. 1). No primeiro caso foi possível remover com segurança cerca de 35 m<sup>3</sup> de carga depositada sobre a abóbada, lastro constituído essencialmente por remanescentes de intervenções do passado. No segundo caso foi possível justificar a origem dos danos presentes na abóbada estrelada e no seu invólucro exterior.

### Caracterização das torres e do dano existente

A primitiva fachada principal da igreja foi construída entre 1176 e 1200 (pano central), sendo as torres elevadas entre 1229 e 1325<sup>7</sup>. A torre norte evoluiu como torre dos sinos e a torre sul como torre do relógio. Há notícia sobre danos causados na torre sul pela queda de um raio, em 1552, na sequência do que, entre 1665-1669, a mesma torre é demolida até meia altura e reconstruída. Contudo, em 1717, regista-se o mau

estado desta torre, tendo-lhe sido adossados contrafortes, dez anos mais tarde, à semelhança aliás dos já existentes na torre norte. A construção que no mesmo período foi encostada a sul, a casa do cabido, terá também servido como contrafortamento da torre. Foram incluídas nesta reforma a abertura do janelão cimeiro e o coroamento barroco de ambas as torres. Na primeira metade do século XIX um segundo raio atinge a torre sul e, em 1951, repete-se o fenómeno, existindo registo fotográfico sobre alguns dos danos então ocorridos.

As torres possuem espessura variável, com um valor mínimo na base de 1,7 m e planta essencialmente quadrada de aresta exterior igual a 10,0 m. Na fachada principal existem dois contrafortes em cada torre. A estrutura das torres é particularmente complexa, não apresentando uma estrutura comum para os vários níveis nem idêntica em ambas as torres. Uma leitura estratigráfica tem encontrado dificuldades face ao processo intenso de construção/reconstrução que esteve em jogo durante vários séculos.

A caracterização da alvenaria que constitui as torres foi efectuada recorrendo a uma câmara boroscópica e a aberturas para sondagem. Face a esta inspecção concluiu-se que a parede é de três panos, possuindo os panos exteriores uma espessura entre 0,45 e 0,70 m em pedra aparelhada de granito, enquanto que o pano interior é constituído por pedra solta e saibro. Observou-se um índice de vazios significativo no interior devido aos movimentos da torre e à lavagem dos finos pela água da chuva (Fig. 2). Salienta-se que a Sé do Porto se localiza numa zona muito exposta à acção do vento e que antes da intervenção as juntas da alvenaria apresentavam zonas de lacunas e de fissuras. Observou-

2. Observação com câmara boroscópica no interior da torre





-se ainda uma deficiente ligação entre os dois panos exteriores da parede, devido à escassez de juntouros e à ruptura de alguns destes.

A torre sul parece encontrar-se significativamente mais afectada que a torre norte. Ambas as torres apresentam um padrão de fendilhação generalizado e empenos significativos dos paramentos que se traduzem num quadro de gravidade moderada. Salienta-se em particular: (a) a separação entre paredes opostas na torre sul, direcção nascente-poente e, na torre norte, direcção norte-sul; (b) fendilhação longitudinal das paredes com previsível esbarrondamento interno. Uma origem mais remota das anomalias é também testemunhada pela colocação, em data que em rigor se desconhece, de três tirantes de secção significativa, mas que encontrámos em estado avançado de corrosão, estando, inclusivamente, o tirante da torre sul partido. A torre sul continuou o movimento de separação entre a fachada poente e nascente após a rotura deste tirante.

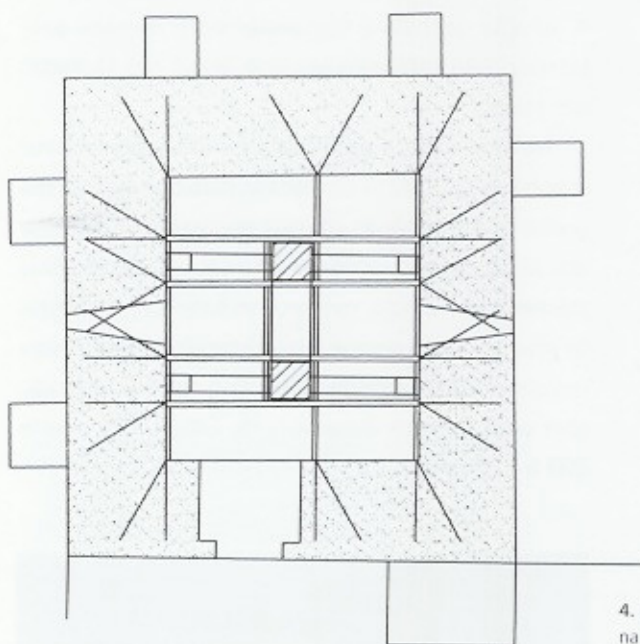
Finalmente, refere-se ainda o piso dos sinos, na torre norte (sete sinos, pesando o maior cinco toneladas), com pavimento em lajeado, suportado por travejamento de pedra apoiado sobre pilares e escoras inclinadas para as paredes exteriores. Pilares e escoras encontram-se fortemente deteriorados e com funcionamento estrutural deficiente. Está disponível uma análise completa das anomalias das torres<sup>3</sup>.

### Medidas de intervenção

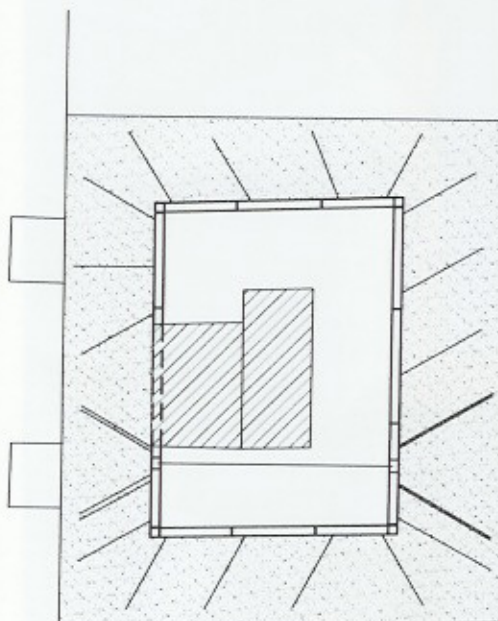
A solução adoptada para o reforço de ambas as torres consiste essencialmente num quadro rígido, que pretende confinar a torre nas duas direcções ortogonais (norte-sul e nascente-poente). Face à estrutura irregular das torres, os quadros foram colocados na única

localização possível (Figs. 4 e 5). São realizados com chapas soldadas, em aço inoxidável (classe AISI 316L), fixadas às torres através de ancoragens longas especiais, em aço inoxidável, envolvidas numa manga de tecido (Fig. 6). O comprimento das ancoragens é tal que a amarração se prolonga até ao pano exterior da parede, salientando-se a necessidade das mesmas serem inclinadas para providenciarem amarração conveniente e ampliarem o efeito de cintagem do quadro metálico. O comprimento dos perfis metálicos foi definido de tal

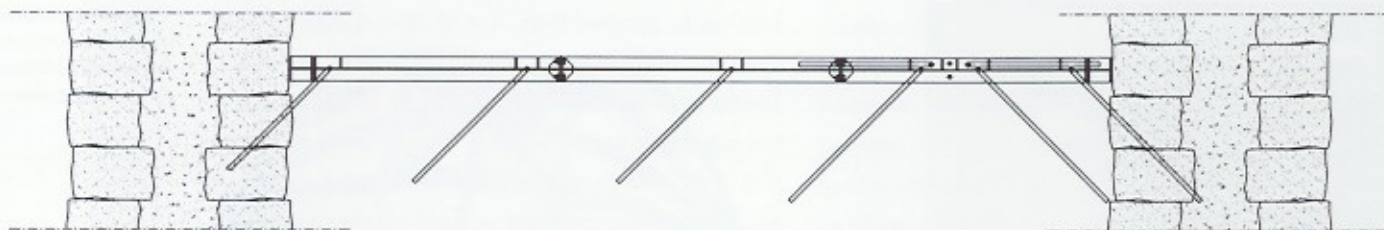
3. Exemplos de fendas na torre sul preparadas para injeção (largura máxima de 20 cm)



4. Planta do quadro metálico na torre norte



5. Planta do quadro metálico na torre sul



6. Corte típico na torre sul

forma para que os elementos pudessem ser transportados através das portas e pudessem ser facilmente montados no local, sem soldadura adicional em obra. A solução descrita é completamente invisível pelo exterior, não causando impacto visual nas fachadas das torres.

Na torre norte, o quadro tem como função adicional suportar o pavimento em lajeado pelo que forma uma grelha que envolve as colunas existentes. Saliente-se que se decidiu não recuperar a função estrutural destas colunas (por exemplo, com recurso à injeção das juntas de assentamento) porque o nível inferior da torre parece possuir resistência insuficiente. O quadro é realizado com perfis U com dimensões de 240 x 120 mm<sup>2</sup> e 200 x 100 mm<sup>2</sup>.

Na torre sul, foi incluído no quadro rígido um conjunto de dois tirantes paralelos, porque era possível e porque se pretendia manter a memória do antigo tirante partido, que foi removido. O quadro atravessa a escada helicoidal da torre, devido à complexa estrutura do interior da mesma. Atendendo à ausência de elementos no interior do quadro, foi necessário recorrer a perfis mais rígidos, tendo-se adoptado perfis I deitados com 180 x 180 mm<sup>2</sup>. Tendo em conta o desaprumo para o exterior das fachadas nascente e sul, e as fendas muito severas junto dos cunhais, foram adicionadas nove pregagens curtas, com o fim de ligar os panos exteriores das paredes, bem como dois tirantes longos pelo interior da parede sul (cerca de 10 m de furação contínua). A Fig. 7 apresenta o aspecto final da torre sul, sendo visíveis as novas cruzes adoptadas para ancoragem, assim como os botões que respeitam às pregagens curtas.

Para além dos trabalhos adicionais de consolidação dos coruchéus, pináculos e balaustradas<sup>4</sup>, refira-se que as fendas a partir de meia altura foram injectadas com argamassa fluida de cal, que as juntas exteriores foram refechadas com duas argamassas de cal (uma para o enchimento e outra mais durável para o acabamento) e que os elementos de ferro existentes foram protegidos contra a corrosão ou substituídos por elementos em aço inoxidável.

Face à importância patrimonial do conjunto e ao dano significativo da torre sul, foi ainda definido e instalado um sistema de monitorização. Este sistema inclui quatro alongómetros nas fendas de maior largura, dois extensómetros nos tirantes novos, dois clinómetros biaxiais para medir a inclinação da torre, bem como sensores de temperatura, humidade e vento. O sistema inclui um interface GSM para monitorização remota e encontra-se em funcionamento desde Janeiro de 2005.

7. Aspecto da torre sul após conclusão dos trabalhos



<sup>1</sup> ICOMOS – Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico. Paris: ICOMOS. 2004. Versão portuguesa disponível em [www.civil.uminho.pt/masonry](http://www.civil.uminho.pt/masonry).

<sup>2</sup> DORDIO GOMES, Paulo – Sé Catedral do Porto, Estudo Histórico e Arqueológico, Faseamento Construtivo do Complexo Monumental e Problematização. Relatório policopiado. Porto. 2002.

<sup>3</sup> LOURENÇO, Paulo B., FERNANDES, Francisco – Diagnóstico e inspecção das torres da Sé do Porto. Relatório 02-DEC/E-3. Guimarães: Universidade do Minho. 2002.

LOURENÇO, Paulo B., MELO, Ângela, CARNEIRO, Mafalda – Remedial measures for the Cathedral of Porto: a post-modern conservation approach. *Structural Analysis of Historical Constructions*. Leiden: Balkema. Vol. 1, 2004, pp. 51-62.

<sup>4</sup> *Idem, ibidem*.