

METODOLOGIAS DE INTERVENÇÃO NO PATRIMÓNIO EDIFICADO

A.G. COSTA
Professor Associado
com Agregação
FEUP

ANTÓNIO ARÊDE
Professor Auxiliar
FEUP

JOÃO GUEDES
Professor Auxiliar
FEUP

E. PAUPÉRIO
Engenheira Civil
IC-FEUP

RESUMO

O principal objectivo desta comunicação é apresentar uma metodologia para a verificação da segurança e reforço do património edificado, seguindo os princípios estabelecidos nas “Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico” [1], que tem sido usada no Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património (NCREP) da FEUP (ver <http://ncrep.fe.up.pt>).

Uma outra finalidade do trabalho é procurar contribuir para a discussão dos procedimentos usados de modo a ser possível, no futuro, o estabelecimento de metodologias comuns, nas diversas instituições, devidamente aferidas e calibradas, para o estabelecimento de normas e princípios que possam servir de base regulamentar.

Palavras-chave: Verificação da Segurança, Modelação Estrutural, Ensaios Experimentais, Reforço Estrutural.

1. INTRODUÇÃO

A metodologia que tem sido usada pelo Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património (NCREP) da FEUP para a verificação da segurança e reforço do património edificado, segue os princípios estabelecidos nas “Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico” [1], nomeadamente que “a especificidade das estruturas do património, com a sua história complexa, requer a organização de estruturas e propostas em fases semelhantes às que são utilizadas em medicina. Anamnese, diagnóstico, terapia e controlo correspondem, respectivamente à análise da informação histórica, identificação das causas dos danos e degradações, selecção das acções de consolidação e controlo da eficácia das intervenções.

A compreensão completa do comportamento estrutural e das características dos materiais é necessária a qualquer projecto de conservação e restauro. É essencial

recolher informação sobre a estrutura no seu estado original, sobre as técnicas e métodos utilizados na sua construção, sobre as alterações posteriores e os fenómenos que ocorreram e, finalmente, sobre o seu estado presente.

O diagnóstico é baseado em informações históricas e em abordagens qualitativas e quantitativas. A abordagem qualitativa não é apenas baseada na observação directa dos danos estruturais e degradações dos materiais, como também na investigação histórica e arqueologia, enquanto que a abordagem quantitativa requer ensaios das estruturas e dos materiais, monitorização e análise estrutural.

Antes de se tomar uma decisão sobre a intervenção estrutural, é indispensável determinar anteriormente as causas dos danos e degradações, e em seguida, avaliar o nível de segurança actual da estrutura.

A avaliação da segurança, que constitui a etapa seguinte ao diagnóstico, é a fase em que a decisão sobre a possível intervenção é definida, sendo necessário conciliar a análise qualitativa com a análise quantitativa.

Toda a informação adquirida, o diagnóstico (incluindo a avaliação da segurança) em qualquer decisão sobre a intervenção, deve ser discutida em detalhe no “Relatório de Avaliação”.

Este relatório deve conter uma análise crítica e cuidada da segurança da estrutura, de forma a justificar as medidas de intervenção e facilitar o juízo sobre as decisões a tomar.

Essas medidas deverão ser dirigidas à raiz das causas que provocaram os danos e nenhuma acção deverá ser empreendida sem se demonstrar que é indispensável. Todo e qualquer projecto de intervenção deverá “ser baseado numa compreensão clara dos tipos de acções que foram a causa dos danos ou degradações e das acções que irão actuar no futuro” [1].

2. METODOLOGIA DE INTERVENÇÃO

A metodologia de intervenção que tem sido usada no NCREP procura respeitar os princípios referidos anteriormente, começando na generalidade dos casos por uma ou várias inspecções à construção que, frequentemente, ultrapassam bastante o foro estritamente estrutural. De facto, a fim de respeitar a história que confere um carácter por vezes único à edificação em apreço, as inspecções devem ser acompanhadas de um levantamento histórico que permita datar a estrutura, analisar a sua trajectória, as alterações e outras intervenções sofridas no tempo, de modo a melhor compreender o seu estado actual [2]. Esse levantamento inclui visitas ao local, conversas com os proprietários e/ou pessoas ligadas à edificação, recolha de elementos históricos escritos ou fotográficos e consultas de especialistas [3].

Naturalmente, dependendo do maior ou menor grau de actuação, quer de análise para avaliação de segurança, quer de efectiva intervenção de reabilitação e/ou reforço estrutural, a inspecção e diagnóstico deverão cobrir uma maior ou menor gama de

aspectos. Independentemente de serem (ou não) todos considerados num dado caso específico apresentam-se os procedimentos que têm sido adoptados nos diversos trabalhos realizados ao longo dos últimos anos pelo NCREP:

1. *Recolha e análise histórica*
2. *Danos observados*
3. *Caracterização geométrica da construção existente*
4. *Caracterização mecânica*
5. *Identificação e estabelecimento de modelos estruturais adequados*
6. *Calibração do modelo numérico*
7. *Análise e interpretação dos resultados*
8. *Avaliação da Segurança*
9. *Técnicas de reforço a aplicar*

Os aspectos mencionados, não sendo exaustivos da prática de inspecção e diagnóstico, configuram um conjunto de etapas importantes a ter em conta e que, em larga medida, constituem a metodologia adoptada nos diversos casos práticos que o NCREP tem tratado ao longo dos últimos anos. De realçar que um aspecto fundamental a ter em conta neste tipo de trabalhos é o que se refere à *monitorização das construções*, que deverá ser sempre implementado, se possível logo no início do estudo, para que os resultados dessa monitorização possam ajudar na decisão a tomar e possam no futuro avaliar a qualidade da intervenção realizada.

A execução da obra deverá ser sempre realizada por pessoal qualificado. Este tipo de intervenção exige empresas vocacionadas para este tipo de trabalhos, que estejam habituados a usar tecnologias apropriadas e que possam interagir com a equipa projectista, já que no decorrer da obra surgem normalmente situações que obrigam a medidas especiais ou a alterações importantes que devem ser explicadas e apreendidas de uma forma célere e eficiente pela pessoas responsáveis pela obra.

Iremos procurar clarificar e discutir cada um dos procedimentos referidos associando-os a casos práticos e procurando mostrar que em qualquer um desses casos o respeito e a preocupação pelas Recomendações do ICOMOS tem estado sempre presentes no trabalho desenvolvido no NCREP.

2.1 Recolha e análise histórica

O conhecimento dos critérios de projecto inicial (quando disponíveis) e de eventuais sucessivas fases de construção ou intervenções estruturais, assim como das técnicas de construção e características dos materiais usados, pode ser de grande utilidade para a interpretação do comportamento estrutural e para a definição de pesquisas adicionais de maior especificidade [4]. Nas Figuras 1 e 2 apresentam-se alguns exemplos de elementos recolhidos na pesquisa histórica. No caso da Figura 1 apresentam-se fotografias relativas ao estudo desenvolvido para a Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar [5], e na Figura 2 a) uma fotografia alusiva à construção da Ponte Luiz I e obtida no âmbito de um estudo que teve como principal objectivo avaliar as consequências da passagem do metro na referida ponte e ao mesmo tempo efectuar um levantamento das anomalias que a obra apresentava, já que as últimas intervenções de manutenção tinham

decorrido nos anos 80 [6]. Na Figura 2 b) apresentam-se pormenores de armaduras do sistema Hennebique, recolhidas no trabalho de avaliação da segurança estrutural do edifício Palladium, sito no gaveto das ruas de St^a Catarina e de Passos Manuel no Porto e onde foi possível verificar que na perspectiva da Engenharia Civil o edifício teve muitos motivos de interesse, uma vez que se tratava de um dos primeiros, se não mesmo o primeiro edifício construído na cidade do Porto inteiramente em betão armado, [7].

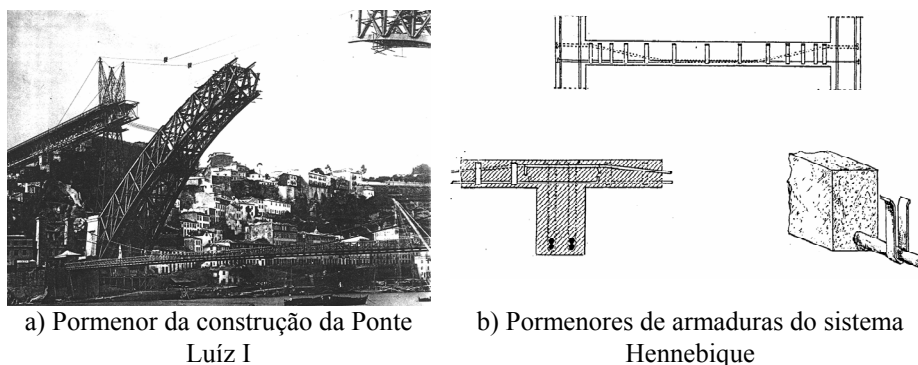
Ao tempo esta tecnologia, então nascente, era exclusiva de certos "engenheiros-construtores" detentores de patente como é o caso de Coignet, Hennebique e outros.

A consulta de tratados da época (C. Berger e V. Guillerme - La Construction en Ciment Armé - 1909; M.-A. Morel - Le Ciment Armé et ses Applications - 1913; M. G. Espitallier - Béton Armé - 1913) que descrevem os vários sistemas então utilizados, permitem uma provável atribuição da construção a Hennebique cuja pormenorização de armaduras é muito idêntica àquela que se encontrou na pesquisa bibliográfica efectuada.

Destes pormenores referem-se como mais característicos, a utilização de estribos em chapa de ferro, abraçando cada um apenas um varão inferior ao seu correspondente na face superior, quando existe, e a utilização de varões de momentos negativos que, muito próximo ainda dos apoios, são baixados em direcção aos terços de vão, transpondo para o interior do betão o esquema de "viga armada", ou seja com tirante exterior, Figura 2 b).



Figura 1: Recolha de informação histórica.



a) Pormenor da construção da Ponte
Luís I

b) Pormenores de armaduras do sistema
Hennebique

Figura 2: Recolha de informação histórica.

2.2 Danos observados

A identificação de todas as patologias (estruturais em particular) e a elaboração de um registo fotográfico detalhado e adequadamente localizado nas peças desenhadas da construção é um dos aspectos essenciais no desenvolvimento deste tipo de trabalhos. Em particular, o levantamento das fendas observáveis na estrutura, a sua distribuição e abertura são elementos importantes para uma avaliação qualitativa primária do equilíbrio e da segurança estrutural, bem assim como o reconhecimento de possíveis causas de instabilidade [8]. Especial atenção deve ser devotada à eventual presença de água no interior das construções, frequentemente resultante de problemas de infiltrações ou de deficiente drenagem das águas pluviais e que estão na origem de muitas avarias estruturais. Em regra, uma inspecção visual pode já fornecer informações preciosas sobre o estado de conservação e sobre as medidas a adoptar na fase de reabilitação. No caso da ocorrência de uma catástrofe natural, por exemplo um sismo, situação mais ou menos frequente nos Açores, os danos podem ser significativos e distribuídos pelas diversas construções históricas das ilhas, afectando de um modo muito significativo o património português. Nas Figuras 3 a) e 3 b) apresentam-se dois aspectos da destruição causada pelo sismo de 9 de Julho de 1998 numa Igreja da Ilha do Pico, Figura 3 a) e numa moradia da Ilha do Faial, Figura 3 b), (para mais informação ver [9] e [10]). Na Figura 3 c) apresenta-se um aspecto dos danos verificados na Igreja de St. António de Viana do Castelo [11], atribuíveis a um assentamento na base das colunas tendo-se recomendado um plano de monitorização, que foi efectuada e que irá permitir compreender o tipo de movimentos que as colunas estão a sofrer e a partir da análise desses resultados a intervenção a efectuar.



Figura 3: Danos Observados.

2.3 Caracterização geométrica da construção existente

A definição geométrica da construção existente, recorrendo a elementos já existentes ou baseada (ou complementada) em levantamentos com meios topográficos tradicionais ou com técnicas fotogramétricas é fundamental num trabalho desta natureza. Um estudo geométrico rigoroso permite desde logo detectar eventuais irregularidades, tais como desvios verticais e horizontais relacionados com as avarias estruturais [8]. No caso da Igreja de Vimioso, Figura 4 a) [12] esse levantamento permitiu detectar irregularidades ao nível da nave da cobertura, em contrafortes e no arco do altar. No caso da Ponte Luiz I, Figura 4 b), teve-se acesso ao projecto original, cuja memória descritiva era assinada

por Gustave Eiffel e foi possível verificar que o projecto não correspondia ao que tinha sido efectivamente construído. Os desenhos disponíveis do projecto original, Figura 5, permitiram quase na totalidade definir a geometria geral da obra, a menos de algumas questões levantadas quando se depararam com desenhos que continham correcções feitas *à posteriori*. Houve assim necessidade de analisar a obra real de modo a despistar as dúvidas que surgiram no levantamento da geometria.

A confrontação da informação disponível com a obra real, permitiu concluir que a zona central compreendida entre os dois maiores pilares metálicos é a única que se encontra em conformidade com o projecto original.

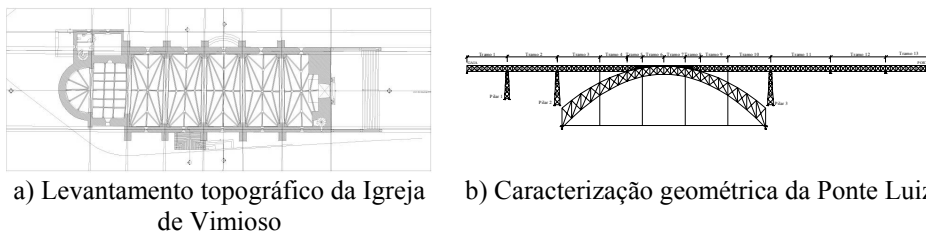


Figura 4: Caracterização Geométrica.

Os restantes tramos do tabuleiro superior, quer do lado de Gaia quer do lado do Porto, apresentam comprimentos diferentes. Verificou-se ainda que as vigas do 1º tramo do lado de Gaia se encontram divididas em 8 aspas, em vez das 9 de projecto, e as vigas do 2º tramo constituídas por 10 aspas em vez das 11 de projecto. Aspa é a porção de viga entre dois montantes consecutivos [6].

Figura 5: Alçado de montante, reprodução do projecto original.

2.4 Caracterização mecânica

No desenvolvimento do trabalho é fundamental a definição de eventuais ensaios a realizar para caracterização dos materiais e da estrutura, incluindo os elementos das fundações. Os ensaios sobre materiais de diversas partes da estrutura e das fundações, através da recolha de amostras para análise em laboratório ou mediante ensaios não-destrutivos (ou até ligeiramente destrutivos) realizados *in-situ*, destinam-se essencialmente à sua caracterização física e mecânica e, eventualmente à identificação e calibração de relações constitutivas a usar nos modelos estruturais [13]. Por seu turno, os ensaios estáticos ou dinâmicos envolvendo a construção no seu todo ou em partes,

são destinados a validar o seu comportamento estrutural quer em termos das suas prestações em serviço (ex.: ensaios de carga) quer em termos de resultados comparativos para calibração do modelo estrutural [6].

No caso de estruturas de alvenaria de pedra, podem-se extrair carotes de pedra, e de pedra e junta de modo a ser possível realizar uma série de ensaios, por exemplo, de compressão e tracção da pedra, ensaios de carga normal e de deslizamento em juntas, etc. Por outro lado devem ser efectuados outros ensaios *in situ*, por exemplo de medição da velocidade de ultra-sons, tomografias, etc. Na Figura 6 apresenta-se os ensaios realizados na Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar, situada em Vila Nova de Gaia, num estudo desenvolvido no âmbito de uma tese de mestrado [5].

A extracção das amostras a ensaiar, que foi realizada em duas paredes da fachada da igreja, com recurso a uma máquina de corte rotativo com coroa diamantada, permitiu ter uma ideia da disposição das pedras ao longo do interior das paredes, bem como dos vazios das mesmas.

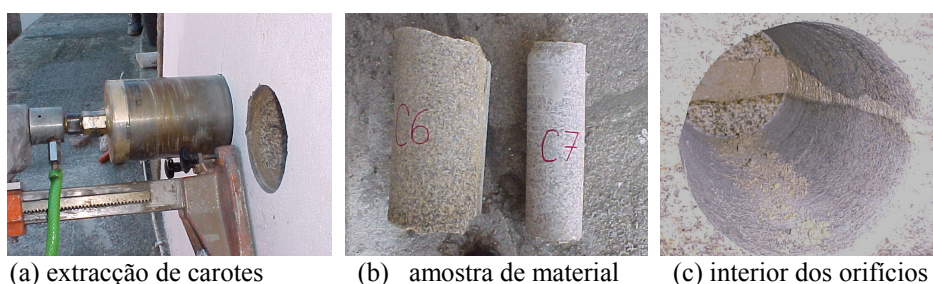


Figura 6: Extracção de carotes na Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar.

A partir das carotes extraídas no local é possível realizar uma série de ensaios, de que se apresentam alguns na Figura 7, que permitem obter a resistência à compressão, à tracção, ao corte e o módulo de elasticidade.



Figura 7: Ensaio sobre carotes de pedra.

As construções históricas são normalmente realizadas em paredes de alvenaria com juntas secas ou com junta com argamassa, sendo importante quantificar a resistência a cargas normais e ao deslizamento dessas juntas. Na Figura 8 apresentam-se alguns ensaios realizados.

A partir dos ensaios de carga normal e de deslizamento [5] pode-se estimar a rigidez normal e tangencial das juntas, permitindo definir a sua lei de comportamento.



(a) provete de junta

(b) fase inicial do ensaio

(c) provete após ensaio de corte

Figura 8: Ensaio de caracterização das junta.

Além de ensaios a provetes extraídos nas construções, é possível avaliar as características de elementos estruturais, recorrendo a outro tipo de ensaios.

No estudo já referido [5] determinou-se o módulo de elasticidade das paredes da Igreja (referido à zona ensaiada) com recurso à utilização de um dilatómetro, que através da aplicação de uma pressão do tipo hidrostática exercida pelo dilatómetro (nomeadamente na zona da membrana do aparelho) sobre as paredes de furos realizados na estrutura, Figura 9, e com recurso à medição dos deslocamentos resultantes da pressão aplicada, permite determinar o módulo de elasticidade da zona em análise [5].



(a) equipamento

(b) colocação do dilatómetro

(c) ensaio

Figura 9: Ensaio de dilatómetro.

Também é frequente recorrer-se a ensaios experimentais, no local ou em laboratório para caracterizar mecanicamente elementos estruturais. Na Figura 10 apresenta-se dois exemplos de ensaios que permitiram avaliar a capacidade resistente das paredes à acção dos sismos mas também obter o módulo de elasticidade das paredes [14] e [15].



a) Ensaio no Faial em paredes de alvenaria de moradias

b) Ensaio em laboratório numa parede de alvenaria proveniente dos Açores

Figura 10: Ensaio em elementos estruturais.

2.5 Identificação e estabelecimento de modelos estruturais adequados

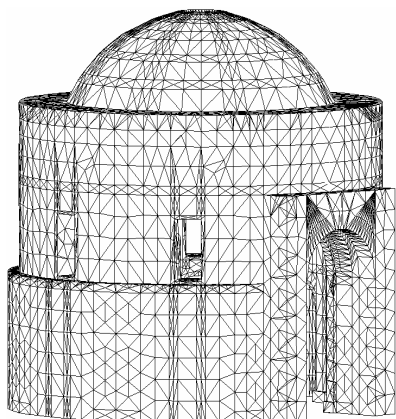
A identificação e estabelecimento de modelos estruturais adequados, baseados em premissas coerentes com a observação da estrutura e com os resultados dos ensaios experimentais (caso existam) é um ponto essencial na avaliação da segurança das construções existentes. Esta avaliação da segurança é uma tarefa difícil, uma vez que os métodos de análise estrutural utilizados para construções novas podem não ser precisos nem fiáveis para as estruturas históricas, podendo resultar em decisões inadequadas. Isto deve-se a diversos factores, tais como a dificuldade em entender correctamente a complexidade de uma construção antiga ou monumento, as incertezas relativas às características dos materiais, a representação imperfeita do comportamento estrutural, associada às simplificações adoptadas. A essência do problema é identificar modelos numéricos que descrevam adequadamente a estrutura e os fenómenos associados com toda a sua complexidade, tornando possível a aplicação das teorias disponíveis.

A análise estrutural é uma ferramenta indispensável mas a compreensão dos aspectos - chave e a fixação correcta dos limites para o uso das técnicas matemáticas depende da utilização que o especialista faz do seu conhecimento científico. Qualquer modelo deverá ter em conta três aspectos fundamentais na avaliação da segurança: o esquema estrutural, as características dos materiais e as acções a que a estrutura está submetida. Na definição dos modelos estruturais convém ainda ter em conta o objectivo da modelação, já que tal poderá influenciar a configuração dos modelos. Estes podem ser concebidos com o objectivo de reproduzir e interpretar as avarias estruturais encontradas, ou de prever a resposta estrutural sob condições ainda não experimentadas ou ainda de simular os efeitos resultantes de intervenções de reabilitação e/ou reforço [4].

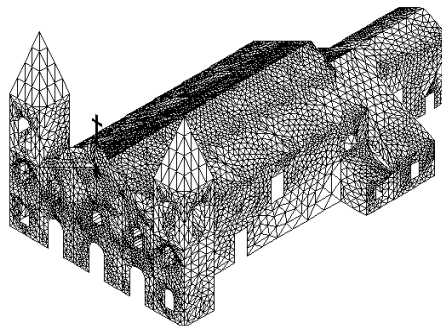
Nos trabalhos desenvolvidos pelo NCREP tem sido usado o programa, NLDYNA, que foi desenvolvido na FEUP [16] e permite utilizar elementos sólidos tridimensionais e elementos de barra, entre outros, tendo sido adoptado para realizar as modelações e análises de construções em alvenaria. Com os elementos sólidos tridimensionais modelam-se as paredes de alvenaria, escadas, pilares, vigas, etc. Os elementos de barra serviram para modelar os barroteiros de madeira que constituem o pavimento e o tecto.

Outro programa bastante usado é o CASTEM2000, [17] que é uma ferramenta mais geral de modelação e análise estrutural e está disponível na FEUP desde 1997 através de um protocolo de utilização e desenvolvimento estabelecido com a sua instituição de origem, o CEA (Centro de Energia Atómica francês) em Paris. Em estreito contacto com o Laboratório ELSA (European Laboratory for Safety Assessment) da Comissão Europeia em Ispra, Itália, que é uma instituição com forte experiência na utilização de CASTEM2000 e onde o segundo e o terceiro autores desenvolveram trabalhos de investigação, este programa tem vindo a ser usado de forma intensiva na FEUP (e sob orientação dos autores) no âmbito do estudo de estruturas antigas de alvenaria de grandes dimensões [5], [18]. Na Figura 11 apresentam-se os modelos numéricos da Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar sita em Vila Nova de Gaia e o da Igreja das Bandeiras da Ilha do Pico, Açores, modeladas com recurso ao CASTEM2000, na Figura 12 a) o modelo estrutural de uma moradia da Ilha do Faial, Açores modelada com recurso ao NLDYNA e na Figura 12 b) o modelo da Ponte Luiz I que foi modelada

com recurso ao programa FEMIX [19] desenvolvido na FEUP e que foi usado em alguns casos.

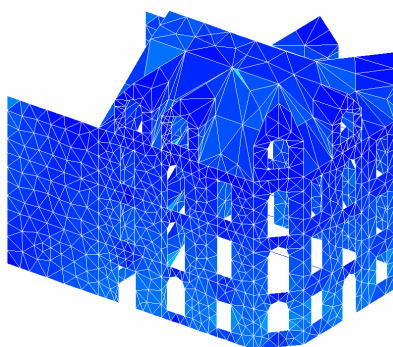


a) Igreja do mosteiro da Serra do Pilar

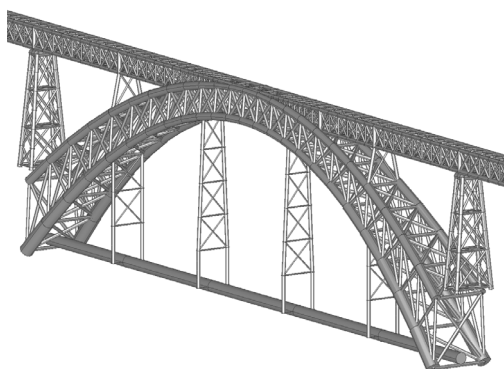


b) Igreja dos Aços

Figura 11: Modelos numéricos.



a) Moradia dos Aços



b) Ponte Luíz I

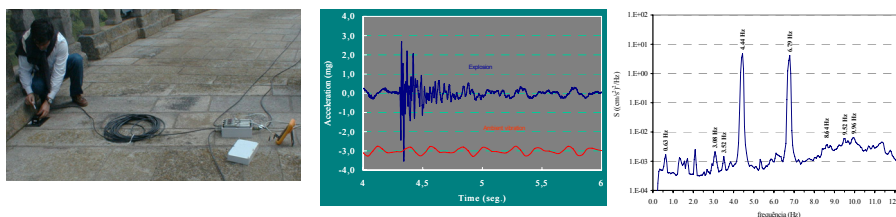
Figura 12: Modelos numéricos.

2.6 Calibração do modelo estrutural

A calibração dos modelos numéricos e o ajuste criterioso dos parâmetros de comportamento (eventualmente sustentado por análises de sensibilidade), de forma a reproduzir o melhor possível a resposta estrutural obtida dos ensaios experimentais, assumem particular importância na avaliação da segurança de uma construção existente.

Esta calibração é normalmente efectuada com recurso à comparação das frequências numéricas com as experimentais. Assim, numa primeira fase são calculadas as frequências próprias das estruturas das construções, usando-se para as propriedades dos materiais os valores obtidos nos ensaios realizados in situ [14]. Numa segunda fase, e sempre que possível, são medidas experimentalmente as frequências nos locais, procedendo-se em seguida à comparação com os valores obtidos no cálculo, permitindo

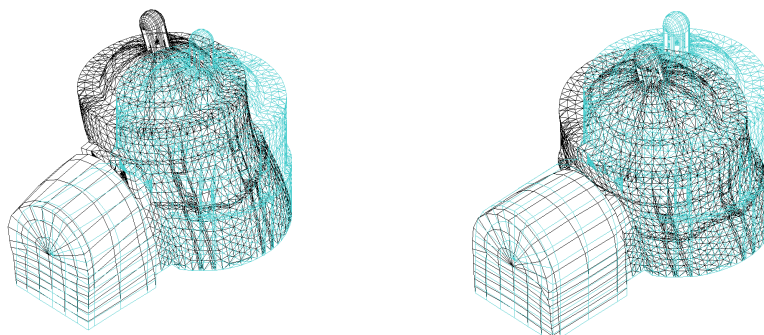
assim realizar uma calibração mais sustentada dos valores adoptados para essas propriedades dos materiais (basicamente, o módulo de elasticidade da alvenaria). A medição experimental das frequências tem sido realizada de uma forma sistemática em quase todas as construções onde o NCREP tem intervenido, para calibrar as propriedades dos materiais, muitas vezes procurando obter só a primeira frequência [14], [15], [20] e noutras procurando-se fazer uma identificação modal de modo a ser possível a obtenção das primeiras frequências e dos respectivos modos de vibração, [18], [21], [22]. Na Figura 13 apresenta-se os registos obtidos na campanha experimental realizada na Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar e na Figura 14 os modos de vibração obtidos numericamente.



a) Instalação de sensores

b) Registos e cálculo de correlações

Figura 13: Calibração de modelos numéricos.



a) 1º modo de vibração

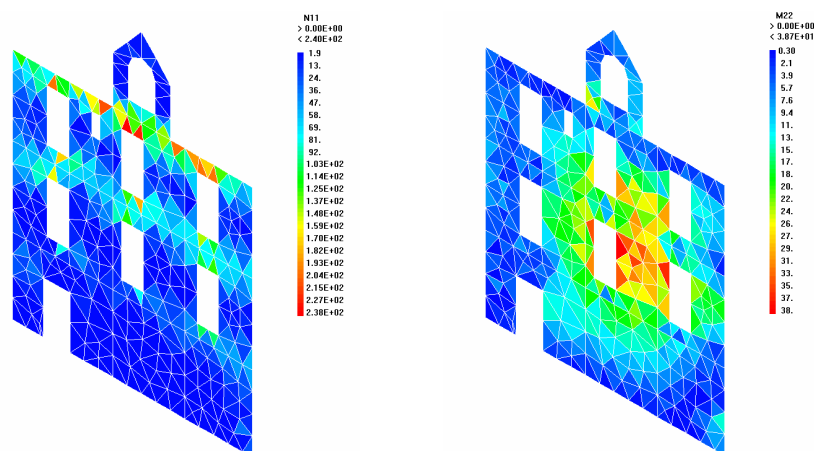
b) 2º modo de vibração

Figura 14: Modos, numéricos, de vibração da Igreja da Serra do Pilar.

2.7 Análise e interpretação dos resultados

A análise estrutural é uma ferramenta indispensável. Mesmo quando os resultados do cálculo e a análise não são exactos, é possível obter distribuições das tensões e isostáticas de tracção e compressão que permitem identificar possíveis zonas críticas, Figura 15 [10]. Os modelos numéricos, devidamente calibrados, como se referiu no ponto anterior, permitem a comparação dos danos teóricos produzidos pelos diferentes tipos de acções com os danos efectivamente observados, ver Figura 16 relativa ao estudo efectuado para o reforço da Igreja das Bandeiras, na Ilha do Pico, [9]. É evidente que a compreensão do comportamento estrutural da construção e a análise e interpretação dos resultados, bem como a correcta definição dos limites de validação dos modelos numéricos, dependem da utilização que o especialista faz do seu conhecimento científico e da sua experiência prática. Um programa apropriado de

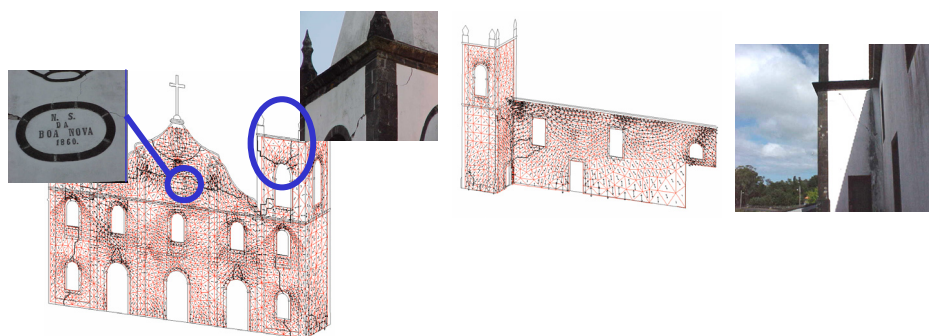
investigação, com vários técnicos envolvidos, a experiência de vários casos acompanhados ao longo do tempo e, sempre que possível, monitorizados, podem aumentar a fiabilidade da análise e da interpretação dos resultados, sendo este um dos aspectos que o NCREP mais tem pugnado ao longo dos tempos.



(a) Esforços normais

(b) Momentos flectores

Figura 15: Tensões máximas na fachada principal.



(a) Fachada Principal e Torres

(b) Torre direita e alçado lateral direito

Figura 16: Isostáticas de tracção e compressão e fendas verificadas no local.

2.8 Avaliação da segurança

A avaliação da segurança é efectuada com base na análise dos resultados obtidos na modelação estrutural e da sua comparação com a capacidade resistente dos elementos estruturais que compõem o edifício. Com base em princípios e regras pré-definidas, são identificados os diversos elementos a reforçar.

A avaliação da segurança é um passo essencial na análise e interpretação dos danos observados e na conclusão do diagnóstico, dado que permitirá tomar decisões sobre a necessidade e extensão das medidas de intervenção. No entanto, esta tarefa é extremamente difícil uma vez que a dificuldade em entender correctamente a complexidade de uma construção antiga ou monumento, as incertezas relativas às

características dos materiais (apesar da calibração dos modelos já referida) e o conhecimento deficiente da história correcta da construção, levantam dificuldades, que, por vezes, só a realização de ensaios de carga ajuda a ultrapassar [23] e a monitorização e a experiência da equipa permitem contornar.

A análise combinada de toda a informação obtida em cada um dos pontos descritos anteriormente e o estabelecimento de determinados princípios [7], podem conduzir à melhor decisão sobre as medidas a tomar. Por exemplo, no trabalho já referido sobre a Ponte Luíz I, elaborou-se um programa que gerava o desenho da ponte, colorindo as barras de acordo com a tensão nelas instalada. Para os intervalos de tensão correspondentes a cada cor, idênticos para tracção e compressão, foi adoptado o seguinte esquema:

 $0.5 \geq \frac{\sigma_{\text{instalado}}}{\sigma_{\text{rd}}}$ (preto)	 $0.875 < \frac{\sigma_{\text{instalado}}}{\sigma_{\text{rd}}} \leq 1.0$ (azul claro)	 $1.125 < \frac{\sigma_{\text{instalado}}}{\sigma_{\text{rd}}} \leq 1.25$ (amarelo)
 $0.5 < \frac{\sigma_{\text{instalado}}}{\sigma_{\text{rd}}} \leq 0.875$ (azul escuro)	 $1.0 < \frac{\sigma_{\text{instalado}}}{\sigma_{\text{rd}}} \leq 1.125$ (verde)	 $\frac{\sigma_{\text{instalado}}}{\sigma_{\text{rd}}} > 1.25$ (vermelho)

A tensão σ_{rd} , usada para tensão de referência, foi obtida por majoração da tensão que, de acordo com a literatura especializada, é considerada como tensão admissível para aços de obras com idade idêntica à Ponte Luíz I, ou seja, 105 MPa. Os ensaios experimentais efectuados com os provetes retirados da ponte confirmaram este valor.

$$\sigma_{\text{rd}} = 1.5 \times 105 = 157.5 \text{ MPa}$$

A apresentação dos resultados revelou-se muito sugestiva e a sua interpretação resulta bastante simplificada, tornando evidentes as barras cujas tensões estão próximas ou excedem o valor máximo admissível. A Figura 17 exhibe, para uma dada combinação das acções, a coloração da ponte conforme a tensão instalada nas barras, de acordo com os intervalos anteriormente apresentados e donde é possível concluir quais as barras a reforçar.

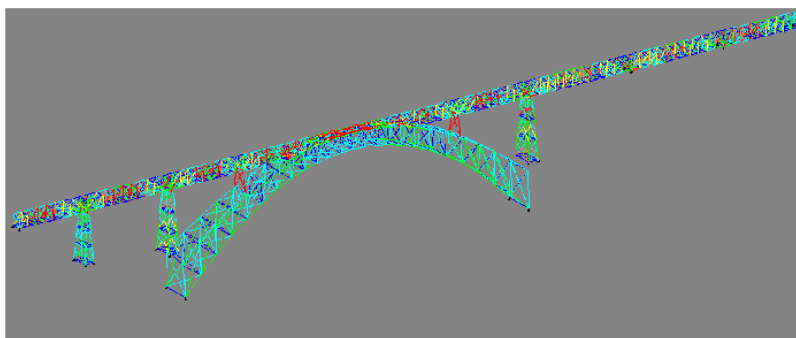


Figura 17: Coloração dos elementos estruturais da Ponte Luíz I em função da tensão instalada.

2.9 Técnicas de reforço a aplicar

A decisão e a escolha das técnicas de reforço devem ser o resultado da análise global e de investigação. Em primeiro lugar, deve-se avaliar a segurança presente e depois os níveis esperados ou que podem ser alcançados como resultado da acção; a análise matemática, especialmente com respeito ao comportamento sísmico de construções antigas, é frequentemente só parcialmente fidedigna e a análise teórica deveria ser sempre interpretada em função do comportamento da estrutura ao longo do tempo e com observação no local precisa e com muita experiência prática [1].

As intervenções em construções, são um compromisso entre a execução de um pequeno trabalho de conservação, tentando não interferir com o conceito original da construção e a necessidade de uma intervenção de reforço para assegurar as exigências de segurança; assim, o trabalho deve ser determinado e deve ser levado a cabo conforme uma análise detalhada das técnicas específicas e tecnologias que eram originalmente usadas na construção.

As técnicas de reforço em construções podem ser essencialmente de dois tipos: preventivas ou interventivas; referindo-se as primeiras às técnicas a usar para prevenir, evitar ou atenuar os danos e o colapso e as segundas às técnicas de intervenção a realizar após a ocorrência dos danos. Qualquer uma destas técnicas passa essencialmente por duas metodologias de intervenção: actuação ao nível global da construção ou intervenção ao nível dos elementos estruturais.

2.9.1 Actuação ao nível global da construção

Nas construções antigas a actuação ao nível global deverá consistir em: assegurar a continuidade entre os diversos elementos estruturais (nestes casos paredes, pisos e coberturas); assegurar as conexões (ligações) entre esses elementos e introduzir apoios (ligações) entre os mesmos. Uma técnica de reforço bastante antiga (implementada na Ilha do Faial, na sequência do sismo de 1927) e que se tem revelado bastante eficiente, consiste na introdução de tirantes ao nível dos pisos, Figura 18, que permitem ligar os panos de parede opostos de alvenaria e que no caso das empenas soltas (paredes orientadas na direcção dos barrotes que realizam o soalho) são fundamentais.



Figura 18: Utilização de tirantes para ligar paredes.

Esta técnica está amplamente difundida e tem vindo a ser aplicada de uma forma sistemática ao longo dos tempos, Figura 19 e também em intervenções recentes nos Açores, Figura 20.



Figura 19: Utilização de tirantes para ligar paredes.



Figura 20: Utilização de tirantes para ligar paredes.

Muitas vezes a colocação desses tirantes poderá colocar problemas estéticos e arquitectónicos, que terão de ser equacionados e resolvidos na altura da execução. Uma solução possível, principalmente para monumentos (igrejas), será a utilização de uma estrutura de cobertura que poderá desempenhar diversas soluções estruturais: tirante a unir a cabeça dos contrafortes; tirantes de sustentação das pedras do arco, de modo a evitar o seu desprendimento e o alívio das cargas no arco (ver Figura 21).



Figura 21: Reforço dos arcos e atirantamento dos contrafortes (Igreja do Bonfim – Projecto do Prof. J. Sarmiento).

Outras técnicas, com os mesmos objectivos, têm vindo a ser aplicadas em obras de reforço. Nas Figuras 22 e 23, apresentam-se alguns exemplos de reforços de construções de alvenaria de pedra, com vista a melhorar o seu comportamento global. Estas técnicas têm como finalidade assegurar as ligações entre paredes opostas, obrigando-as a trabalhar em conjunto e conferindo-lhes apoios ao longo da sua altura. Muitas destas intervenções poderiam ser facilmente aplicadas na reabilitação das construções das cidades de Portugal, nomeadamente em zonas onde a probabilidade de ocorrência de sismos de grande magnitude é maior, principalmente na realização das denominadas obras de “Reabilitação Urbana” e outras do mesmo tipo.



Figura 22: Estrutura metálica para assegurar a ligação entre todas as paredes da construção.

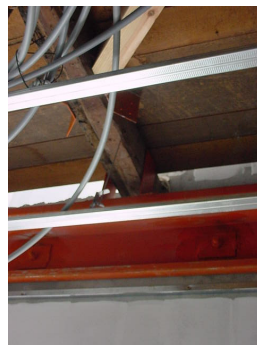


Figura 23: Cantoneira usada em toda a envolvente da construção para assegurar a ligação entre todas as paredes [20].

Em resumo, poderemos referir que, normalmente, as técnicas de reforço a usar, consistem em assegurar o funcionamento correcto de todas as conexões estruturais e melhorar a tensão de tracção nas zonas críticas, sendo as acções de reforço mais frequentes as seguintes:

- Ligação das paredes umas às outras, ligando os elementos individuais, tijolos ou pedras, ou reforçando-os, usando elementos horizontais adicionais ou outros elementos de aço ou fibras, Figura 24. A solução final deste tipo de reforço estará sempre dependente de se conhecer a constituição e o modo construtivo das paredes da construção.

- Deve-se assegurar que a força nos cantos aos níveis de topo onde as forças de compressão são mais baixas devido ao peso reduzido é bem absorvida, podendo em alguns casos obrigar a amarrar a parede a outros elementos construtivos, Figura 25.
- Deve-se assegurar uma boa transmissão dos esforços dos arcos e das abóbadas para os contrafortes e paredes, dado que são elementos muito sensíveis à ocorrência de assentamentos. É importante tentar anular as componentes horizontais dos impulsos que são transmitidos na cabeça das paredes ou dos contrafortes, podendo usar-se para o efeito tirantes ou outras soluções que procurem minimizarem estes esforços, Figura 26.
- As abóbadas e arcos realizados em alvenaria radial não necessitam, normalmente, de reforço especial. Nas abóbadas construídas com “reboco e argamassa pobre” a situação é diferente. Nestes casos, pode-se usar capas de betão em cima do extradoso ou superfície de topo para reforçar a abóbada ou arco, mas este tipo de solução só deverá ser usado como uma medida de emergência, e só depois de perceber bem a constituição da abóbada, e quando nenhuma outra solução seja possível para estabilizar a estrutura.
- A conexão das paredes aos pisos e à cobertura deve ser satisfatória, para prevenir a separação completa da fachada; soluções como a que se apresenta na Figura 27, podem ser muito efectivas, especialmente ao nível de telhado. No entanto, a sua utilização deve ser avaliada no contexto geral da história da construção. A eficiência das conexões entre a cobertura e as paredes, que estão sujeitas a forças perpendiculares horizontais, é importante para a estabilidade das paredes, já que troca o desfavorável comportamento em consola para o "comportamento de viga" apoiada, Figura 28.



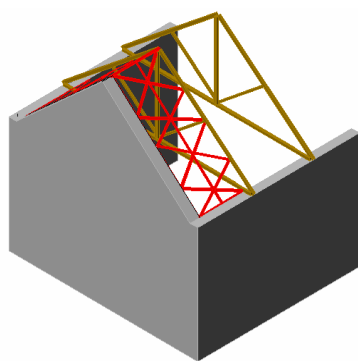
Figura 24: Ligações entre elementos estruturais [9].



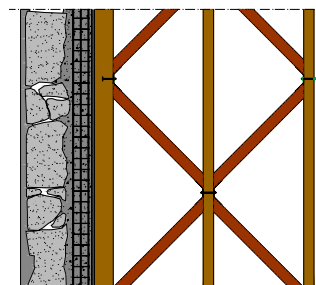
Figura 25: Esquemas de ligação entre paredes [24].



Figura 26: Tirantes para absorver as componentes horizontais dos impulsos.



a) Perspectiva



b) Planta

Figura 27: Amarração da parede na extremidade das paredes [10].



Figura 28: Apoios das paredes ao longo da sua altura [10].

2.9.2 Intervenção ao Nível dos Elementos Estruturais

A intervenção ao nível dos elementos estruturais, no caso das estruturas de alvenaria, está relacionada com os materiais, que nestes casos são: a argamassa que pode ser consolidada ou fortalecida através de diversas tecnologias, que são conhecidas; a alvenaria que pode ser melhorada de modo a evitar-se a separação de pedras únicas e de paredes de revestimento em alvenaria dupla, podendo para o efeito serem usadas injeções e em alguns casos barras adicionais de reforço para assegurar conexões adequadas entre as paredes. Nestes casos as técnicas estão associadas ao melhoramento do comportamento da argamassa e das paredes de alvenaria. Uma técnica que tem sido bastante usada nos Açores e testada em laboratório, com ensaios experimentais realizados em paredes originárias do Faial, Açores, tem sido a aplicação de redes de aço inox em ambas as faces da parede, sendo estas ligadas por conectores metálicos para realizar os chamados “travadouros” das paredes de alvenaria. Nas Figuras 29 e 30 apresentam-se imagens deste tipo de reforço, cuja eficácia foi comprovada em laboratório, [15].



Figura 29: Reforço de paredes de alvenaria com malhas de aço inox [15].



Figura 30: Reforço de paredes de alvenaria com malha de aço inox [15].

Uma outra técnica consiste na injeção do interior da parede, de modo a haver um preenchimento dos vazios internos e uma homogeneização do material, Figura 31.



Figura 31: Injeção em paredes de alvenaria de pedra.

3. CONCLUSÕES

Os principais procedimentos a adoptar numa avaliação de segurança e reforço de uma construção existente, nomeadamente monumentos, foram apresentados e discutidos, procurando-se para cada um deles apresentar casos práticos que têm sido tratados no Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património (NCREP) da FEUP (ver <http://ncrep.fe.up.pt>). e para os quais se tem seguido os princípios estabelecidos nas “Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico” [1].

Uma outra finalidade do trabalho é procurar contribuir para a discussão dos procedimentos usados de modo a ser possível, no futuro, o estabelecimento de metodologias comuns, nas diversas instituições, devidamente aferidas e calibradas, para o estabelecimento de normas e princípios que possam servir de base regulamentar e que possam ser usadas nas instituições do estado que tutelam o património português, nomeadamente a DGEMN e o IPPAR, bem como nas Câmaras Municipais e outras instituições que têm a seu cargo preservar e conservar o património.

Foram também apresentadas diversas técnicas de reparação e reforço, quer ao nível de um reforço global quer ao nível do reforço dos elementos estruturais, que têm sido usadas no NCREP e que podem servir de ponto de partida para o estabelecimento de um manual de reparação e reforço que poderá no futuro dar origem ao estabelecimento de uma normativa neste domínio.

4. REFERÊNCIAS

- [1] ICOMOS – Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico, Lisboa, Junho, 2002.
- [2] Guedes, J.; Costa, A.; Arêde, A.; Paupério, E. – Reabilitação e Reforço de Estruturas Património Nacional. Experiência da FEUP. Seminário Euro-Mediterrânico, Forum UNESCO, Universidade Lusíada, Lisboa, Junho, 2002.
- [3] Costa, A.; Paupério, E.; Cid, P. - Relatório de Inspeção. Muralhas de Barcelos. Departamento de Engenharia Civil. Secção de Estruturas. FEUP, Porto, Maio 2002.
- [4] Arêde, A.; Costa, A. – Inspeção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas. Algumas contribuições da FEUP. Seminário sobre A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação, FEUP-DGEMN, FEUP, Porto, 2002.
- [5] Almeida, C. - Análise do Comportamento da Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar sob a Acção dos Sismos, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2000.
- [6] Costa, A.; Guedes Coelho, A.; Mota Freitas, J.; Azeredo, M.; Cruz, J.; Santos, N.; Lopes, D. - Análise da Ponte Luiz I com vista à utilização pelo Metro Ligeiro do Porto. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, nº 43, LNEC, Lisboa, Fevereiro de 1998.
- [7] Sampaio, J.; Azeredo, M.; Costa, A.; Pinto, D.; Guedes, P. - Avaliação da Segurança da Estrutura do Edifício Palladium - Porto. Relatório Técnico. Serviço de Estruturas do Instituto de Construção, FEUP, Porto, 1992.
- [8] Rossi, P.P. – Inspection and Monitoring for the Restoration of Historical Buildings . Curso de Recuperação e Valorização de Edifícios e Conjuntos Históricos, FUNDEC, IST, Lisboa, Maio, 1998.
- [9] Costa, A.; Arêde, A.; Moreira, D.; Neves, N. - Preliminary seismic analysis and strengthening proposals of two churches in Azores. 1st US – Portugal International Workshop. Grand challenges in earthquake engineering. 250 years after the 1755 Lisbon Earthquake. Edited by Joaquim Barros (UM) and Pedro Silva (UMR), pp. 14.1 – 14.17, 11-13th July, Lamego, 2005.
- [10] Costa, A.; Arêde, A. - Strengthening of Structures Damaged by the Azores Earthquake of 1998. Construction and Building Materials, 2005.

- [11] Delgado, R.; Costa, A.; Rocha, P.; Delgado, P.; Oliveira, J. - Relatório de Inspeção à Igreja de Santo António. Viana do Castelo. FEUP, DECivil-Estruturas, Maio, 2002.
- [12] Machado, A.; Feliz, A.; Silva, B.; Neves, S. – Modelação Numérica para Análise Comportamental Sísmica e Projecto de Reforço da Igreja Matriz de Vimioso. FEUP, DECivil – Estruturas, Relatório, Julho, 2005.
- [13] Gambarotta, L. – Sperimentazione e Modellazione di Ponti ad Arco in Muratura . Pubblicazione Serie I, n. 11 – Atti Giornata di Studio sulla Sperimentazione dei ponti, CIAS, Politecnico di Milano, pp. 250 – 277, Trento, 1999.
- [14] Costa, A. - Determination of Mechanical Properties of Traditional Masonry Walls in Dwellings of Faial, Azores. Earthquake Engineering & Structural Dynamic. ISBN 0098-8847, pp. 1361 – 1382, Volume 31 Number 7, July, 2002.
- [15] Costa, A.; Silva, B.; Costa, A.; Guedes, J.; Arêde, A. - Experimental assessment of the structural behavior of a masonry wall under horizontal cyclic loads". 1st US – Portugal International Workshop. Grand challenges in earthquake engineering. 250 years after the 1755 Lisbon Earthquake. Edited by Joaquim Barros (UM) and Pedro Silva (UMR), pp. 18.1 – 18.9, 11-13th July, Lamego, 2005.
- [16] Faria, R. - Avaliação do Comportamento Sísmico de Barragens de Betão Através de um Modelo de Dano Contínuo, PHD, FEUP, Porto, 1995.
- [17] CEA - CASTEM 2000. Guide d'utilisation, CEA, France, 1990.
- [18] Costa, C. - Análise do Comportamento da Ponte da Lagoncinha sob a Acção do Tráfego Rodoviário – Tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil", FEUP, 2002.
- [19] Azevedo, A.; Barros, J. - Manual de Utilização do Programa FEMIX - Versão 2.1, Porto, 1995.
- [20] Costa, A. - Strengthening and Repairing Earthquake Damaged Structures. Chapter 19 of Book – Assessing and Managing Earthquake Risk. pp. 403 -426. Edited by C.S. Oliveira, A. Roca and X. Goula. Springer, 2005.
- [21] Neves, N. - Identificação Dinâmica e Análise do Comportamento Sísmico de um Quarteirão Localizado na Cidade da Horta – Ilha do Faial, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Julho, 2005.
- [22] Arêde, A.; Almeida, C.; Costa, A.; Rodrigues, J.; Campos Costa, A.- Dynamic Identification and Seismic Analysis of the Serra do Pilar Monastery Church. Proceedings of the International Modal Analysis Conference, Los Angeles, 2002.
- [23] Costa, A.; Guedes, J.; Paupério, E. - Intervenção estrutural (coro alto). Igreja do Pópulo. Braga. FEUP, DECivil-Estruturas, Agosto, 2004.
- [24] Guedes, J.; Costa, A. - Estabilização da Fachada da Igreja de Ponte da Barca. Livro editado por: Aníbal Costa, João Miranda Guedes, Paula Silva e Esmeralda Paupério, ISBN 972-99101-0-3, pág. 375-383, Porto, 2002.