

Metodologia para conservação de estruturas de madeira: Teoria e prática

Paulo B. Lourenço

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães
pbl@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

O interesse da comunidade técnica na conservação e reabilitação do património construído de valor cultural tem aumentado enormemente nos últimos anos. A ausência de normalização para regular a intervenção nestas estruturas dificulta de forma óbvia as intervenções. Discutem-se aqui recomendações recentes, apresentam-se resultados de investigação em curso e apresentam-se casos de estudo de intervenções em património construído de valor cultural em madeira, tendo em vista demonstrar a validade das recomendações.

PALAVRAS-CHAVE: PATRIMÓNIO HISTÓRICO COM VALOR CULTURAL, CONSERVAÇÃO, ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos ocorreram desenvolvimentos muito significativos no que diz respeito à capacidade de efetuar análises experimentais e simulações em computador sobre o património e monumentos históricos. Tais avanços resultam de uma crescente consciencialização por parte da sociedade em relação à necessidade de preservação deste património, juntamente com a evidente importância cultural e económica desta atividade. Recentemente foram aprovadas pelo ICOMOS [1] recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico. Estas recomendações destinam-se a ser úteis para todos os envolvidos nos problemas de conservação e restauro, e não exclusivamente à vasta comunidade de engenheiros.

Um assunto relacionado com este tema é que a engenharia “de conservação” deve ter uma abordagem e capacidade diferentes das usadas no dimensionamento de estruturas novas. Frequentemente, os materiais tradicionais são mutilados ou destruídos por engenheiros que não reconhecem este facto, com o consentimento das autoridades e outros peritos envolvidos. Também se verifica que, mesmo quando são empregues as técnicas de conservação adequadas, existe a tendência das entidades reguladoras e dos engenheiros requererem que as estruturas estejam em conformidade com os regulamentos atuais. Isto é muitas vezes inaceitável, visto que os regulamentos foram escritos tendo em mente outras formas de construção, pelo que a sua aplicação em materiais, tecnologias e formas tradicionais que pertencem a estruturas existente é excessivamente conservadora. A necessidade de reconhecer a diferença entre o projeto moderno e a conservação também é relevante no contexto dos custos associados à contribuição da engenharia. O procedimento habitual de cálculo de honorários de engenharia, como uma percentagem do trabalho realizado, está claramente em oposição com a melhor prática de conservação, visto que idealmente se deveria evitar qualquer intervenção estrutural. Ser capaz de recomendar não tomar qualquer medida pode, na realidade, implicar mais estudos e mais custos reais do que uma recomendação para grandes intervenções.

Os procedimentos das intervenções modernas exigem um levantamento cuidadoso da estrutura, bem como a compreensão da sua história. Qualquer estrutura tradicional é o resultado da conceção e construção originais, das diversas alterações deliberadamente realizadas e da deterioração devida ao tempo e eventos excepcionais. O trabalho do engenheiro em edifícios antigos deve ter em conta que muito do esforço despendido na compreensão do estado atual necessita da compreensão do processo histórico.

As construções com valor cultural, devido à sua natureza e história (dos materiais e da sua ligação), representam desafios na conservação, diagnóstico, análise, monitorização e reforço que impedem a aplicação de normas legais e códigos de construção atuais. São então desejáveis e necessárias recomendações, de modo a assegurar métodos racionais de análise e intervenção, tomando em consideração o contexto cultural. A metodologia recomendada é apresentada de forma simplificada na Figura 1, onde é salientada a necessidade de adotar um processo iterativo, entre as etapas de aquisição de dados, comportamento estrutural, e diagnóstico e segurança. Um objetivo da presente comunicação é salientar que existem ferramentas avançadas. Neste contexto, a utilização de uma metodologia adequada permite a definição das melhores formas de intervenção sobre um caso de estudo real. Assim, apresentam-se, de forma muito resumida, casos de estudo que podem servir de reflexão sobre a possibilidade de utilização da moderna metodologia.

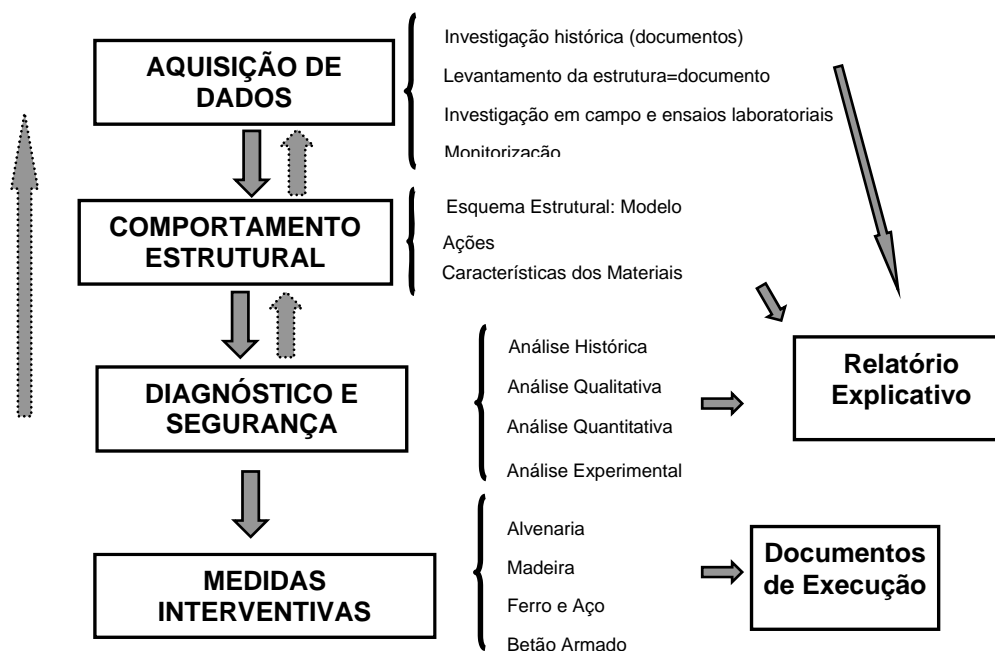


Figura 1 – Fluxograma com a metodologia para intervenções estruturais do ICOMOS [1].

2. INVESTIGAÇÃO RECENTE SOBRE FIABILIDADE ESTRUTURAL

2.1. Caracterização Geométrica

Com o intuito de melhor conhecer as características geométricas dos elementos constituintes das estruturas de madeira antigas, procedeu-se ao levantamento de diversas coberturas de edifícios nacionais, nomeadamente de diversos monumentos situados nas regiões norte e centro de Portugal. As secções transversais das peças foram registadas em intervalos regulares com um paquímetro digital, ver [2] para detalhes.

O primeiro edifício considerado é o Paço dos Duques de Bragança em Guimarães, que embora tenha originalmente começado a ser construído nos séculos XV e XVI, as suas coberturas

O segundo edifício considerado é o Mosteiro de Arouca, que se situa na vila com o mesmo nome e tem origem no século X, sendo que os elementos atualmente presentes no conjunto monástico (cadeiral do coro-baixo, refeitório, cozinha, dormitórios, etc.) constam no século XVIII. Na última década, o IPPAR (actual IGESPAR) procedeu a várias obras de reparação da estrutura, salientando-se a reconstrução e reparação de coberturas e da chaminé da cozinha. A cobertura nave da igreja é constituída por oito asnas com uma tipologia caracterizada por duas linhas horizontais paralelas entre si e a inexistência de pendural nas asnas, ver Figura 2b. A presente cobertura foi sujeita a trabalhos de manutenção e reabilitação recentemente (2003–2005), com colocação de nova telha e subtelha (de fibrocimento) na cobertura, bem como tratamento de fendas longitudinais nas peças roladas com resinas epoxídicas. Em termos de elementos estruturais, as asnas e a cumeeira aparentam ser mais antigas do que a restante estrutura, devido a apresentarem secções transversais roladas, obtidas por aplicação direta dos troncos de madeira em bruto, o que resulta na não retidão do eixo da peça. Já as madres apresentam uma secção transversal retangular e eixo retilíneo, evidenciando uma origem mais recente. Assim, podem-se dividir os elementos estruturais da cobertura em dois grupos distintos: os de secção rolada (oval) e os de secção retangular. Os elementos principais da estrutura (linhas e pernas das asnas e cumeeira) são de secção oval, enquanto as madres apresentam secção retangular. O levantamento de dimensões das secções roladas foi realizado tomando o diâmetro das peças no eixo horizontal e vertical (designadas de -1 e -2, respetivamente), e as secções retangulares foram tomadas através da medição do seu lado menor e maior (b e h , respetivamente). Todas as secções foram medidas periodicamente a uma distância aproximada de 0.60 m, ver Tabela 2. Pode-se verificar que o coeficiente de variação das secções roladas é significativamente superior à das secções retangulares (da ordem dos 20%). Em termos de dimensões, as pernas apresentam uma secção oval onde o maior diâmetro na direção vertical e menor na horizontal, de valores médios da ordem dos $0.230 \times 0.260 \text{ m}^2$. A linha superior tem uma secção transversal média inferior à linha inferior, sendo que ambas as linhas apresentam (em média) secções menores do que as das pernas. Os maiores coeficientes de variação verificados nas linhas (inferior e superior) relativamente às pernas deve-se ao facto dos extremos apresentarem secções transversais menores que o troço intermédio, entre as pernas da asna. As madres apresentam secções quadradas com cerca de 0.140 m de lado e coeficientes de variação compatíveis com os observados noutras estruturas com secções retangulares serradas (12%).

Tabela 2 – Resumo dos resultados obtidos no estudo estatístico das secções transversais dos elementos estruturais da cobertura do Mosteiro de Arouca.

Peça	Dimensão	Média (m)	CoV (%)	Nº medições (-)
Perna S	ϕ_1	0.220	17.8	100
	ϕ_2	0.265	16.3	101
Perna N	ϕ_1	0.237	16.6	100
	ϕ_2	0.264	16.5	99
Linha Superior	ϕ_1	0.217	13.8	44
	ϕ_2	0.214	16.4	59
Linha Inferior	ϕ_1	0.222	19.3	88
	ϕ_2	0.231	20.2	100
Madres	b	0.139	11.7	108
	h	0.142	11.2	108

O terceiro edifício considerado é o Laboratório Chimico da Universidade de Coimbra, que foi erguido entre 1773 e 1775, aquando da reforma Pombalina, sendo o mais antigo laboratório químico do mundo que resistiu até à atualidade. O levantamento das asnas da cobertura da Ala 1 do edifício foi efetuado durante o levantamento do seu estado de degradação, solicitado à Universidade do Minho pela empresa encarregada da reabilitação do Laboratório Chimico. Suspeita-se que as asnas inspecionadas são as originalmente colocadas no edifício, sendo que apresentam sinais de reforço, embora não haja registo dessas intervenções. As peças das asnas apresentavam secção retangular e um elevado grau

de degradação, provocada por caruncho e fungos. Segundo o empreiteiro, a espécie de madeira era Pinho de Riga (uma variedade da espécie *Pinus canariensis* Sweet). A cobertura da Ala 1 do Laboratório Chimico é constituída por quatro asnas com um tirante metálico na sua base e uma linha (em madeira) a meia altura, donde partem as escoras e o pendural, ver Figura 2c. Também se pode verificar a presença dos já referidos elementos estruturais de reforço designados de estrutura auxiliar. A data de colocação destes elementos é desconhecida, sendo que estas peças aparentam ser mais recentes do que a restante asna. Analisando os resultados da Tabela 3, pode-se perceber que as pernas e o pendural da asna apresentam secções transversais muito semelhantes, a rondar os $0.190 \times 0.250 \text{ m}^2$, enquanto as escoras e a linha têm secções de cerca de $0.190 \times 0.200 \text{ m}^2$. O avançado estado de degradação biológica fez com que exista uma variação significativa da secção transversal das peças ao longo do seu eixo, o que justifica o elevado valor do coeficiente de variação. As peças mais afetadas pela degradação são as pernas e a linha sendo sempre a degradação mais evidente nas faces superiores e inferiores no que nas faces laterais. Este resultado é visível nos coeficientes de variação das referidas peças, com valores médios da ordem dos $\text{CoV} = 10\%$ para a base e de $\text{CoV} = 25\%$ para a altura. Os restantes elementos possuem coeficientes de variação da ordem dos $\text{CoV} = 5\%$.

Tabela 3 – Resumo dos resultados obtidos no estudo estatístico das secções transversais dos elementos estruturais da cobertura do Laboratório Chimico, Coimbra.

Peça	Dimensão	Média (m)	CoV (%)	Nº medições (-)
Perna S	<i>b</i>	0.188	13.7	49
	<i>h</i>	0.240	23.1	49
Perna N	<i>b</i>	0.191	13.4	69
	<i>h</i>	0.255	18.6	69
Linha	<i>b</i>	0.197	3.0	53
	<i>h</i>	0.187	35.5	53
Pendural	<i>b</i>	0.193	2.8	23
	<i>h</i>	0.263	5.1	23
Escoras	<i>b</i>	0.189	4.7	28
	<i>h</i>	0.207	6.1	28

O último edifício considerado é o Santuário de São Torcato, que começou a ser erguido no final do século XIX, sendo o corpo principal do templo, onde se inclui a cobertura analisada, foi inaugurado no ano de 1946. A cobertura de três águas é realizada com quatro asnas que apoiam nas suas extremidades em contrafortes com cerca de 0.45 m de espessura e 2.20 m de comprimento. As asnas são de tipologia simples a que se acrescentou uma segunda linha, adiante designada de linha alta, a cerca de meia altura do pendural, composta por duas peças que correm de ambos os lados da asna, ver Figura 2d. As ligações entre peças foram realizadas por intermédio de ferragens (linha e pernas ao pendural), parafusos (linhas altas ao pendural, escoras e pernas) e pregos. As secções transversais médias das peças mostram que as pernas, linha e pendural apresentam uma secção aproximadamente igual, com $0.150 \times 0.300 \text{ m}^2$. As escoras apresentam uma secção de cerca de $0.120 \times 0.220 \text{ m}^2$ e a linha alta apresenta secção dupla de aproximadamente $0.100 \times 0.225 \text{ m}^2$, dispostas de ambos os lados da perna e linha. Os resultados obtidos permitem concluir que se trata de uma estrutura recente, devido à reduzida variação de secções ao longo da peça, como se pode verificar pelos valores reduzidos do coeficiente de variação. A presença de ligadores modernos evidencia o mesmo facto. Restringindo a três as diferentes secções transversais, obtêm-se os resultados da Tabela 4, com valores mais elevados do coeficiente de variação nas peças constituintes da linha, pendural e pernas, com um valor de $\text{CoV} = 8.3\%$ para a menor dimensão (largura) e de $\text{CoV} = 4.2\%$ para a altura da secção transversal. No que respeita às escoras e linhas altas, o coeficiente de variação situa-se abaixo dos 2.2%.

O levantamento geométrico apresentado inclui diferentes tipos de estruturas de madeira, diferentes períodos (do séc. XVII ao séc. XX) e diferentes estados (desde muito

danificado a quase intacto). Uma diferença relevante entre as estruturas é que duas delas tinham mais de 200 anos (pré-industriais) e utilizavam troncos rolados enquanto as outras duas tinha cerca de 70 anos (pós-industriais), e utilizavam secções em esquadria. A Figura 3 mostra as diferenças evidentes entre os elementos estruturais.

Tabela 4 – Resumo dos resultados obtidos no estudo estatístico das secções transversais elementos estruturais da cobertura do Santuário de S. Torcato.

Peça	Dimensão	Média (m)	CoV (%)	Nº medições (-)
Linhas, Pernas e Pendural	<i>b</i>	0.133	8.3	160
	<i>h</i>	0.291	4.2	160
Escoras	<i>b</i>	0.123	1.6	80
	<i>h</i>	0.225	0.7	80
Linhas altas	<i>b</i>	0.100	2.0	80
	<i>h</i>	0.225	2.2	80



Figura 3 – Aspeto das coberturas: (a) pré-industrializada com secções roladas, Mosteiro de Arouca; (b) pós-industrializada com secções em esquadria, Paço dos Duques de Bragança

Apesar de a amostra ser pequena, as estruturas com secções retangulares e idade até cerca de 100 anos apresentam deterioração biológica reduzida e um coeficiente de variação de cerca de 5%. No caso das estruturas mais antigas de madeira, a deterioração é mais relevante e as incertezas são maiores. Se assumirmos que o Mosteiro de Arouca pode ser representativo de secções roladas com deterioração moderada a baixa, o coeficiente de variação é de cerca de 15%. Se assumirmos que o Laboratório Chimico é representativo de estruturas de madeira fortemente deterioradas, os valores do coeficiente de variação atingem valores de 20% ou superiores. No caso do castanho em Portugal, verifica-se uma deterioração muito baixa ao fim de 70 anos em serviço e apenas deterioração moderada depois de algumas centenas de anos em serviço. No caso das madeiras resinosas, após 200 anos de serviço, o nível de segurança encontrado era totalmente inaceitável.

2.2. Aplicação a uma Asna Tradicional

Ilustra-se agora a aplicação dos modernos conceitos de fiabilidade estrutural a uma asna tradicional, assumindo 6.00 m de vão em pinho bravo, ver Figura 4. As secções adotadas replicam as condições habituais e as ações de acordo com a regulamentação europeia, incluindo o peso próprio e a ação da neve. A combinação condicionante considera uma configuração não-simétrica da ação da neve. Assumiu-se uma taxa de deterioração da madeira adequada para climas temperados, de acordo com [3]. A segurança estrutural foi obtida através de simulação recorrendo ao método de Monte-Carlo, considerando comportamento elástico linear e um comportamento frágil em que a rotura do elemento mais solicitado corresponde à

rotura da estrutura, o que é usualmente correto para asnas simples. A deterioração foi introduzida apenas na parte inferior da perna esquerda, tendo sido assumido que a deterioração ocorre nas quatro faces do elemento. Este elemento foi seleccionado devido à proximidade do apoio e ao facto de estar na zona inferior do telhado, pelo que é mais provável que se encontre submetido a teores de humidade mais elevados, o fator mais relevante na deterioração de estruturas de madeira.

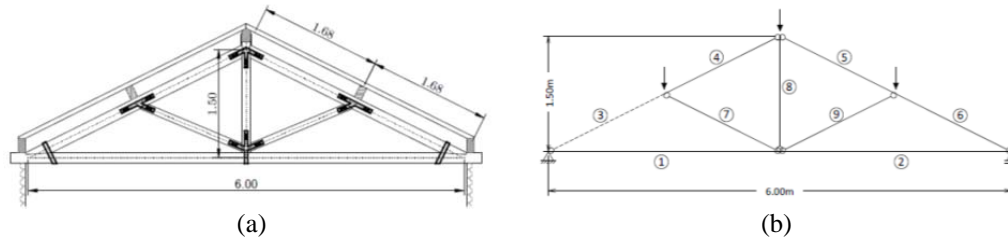


Figura 4 – Asna tradicional: (a) Aspeto típico; (b) Modelo estrutural e numeração das barras

Foram analisadas 1.2×10^7 simulações ao longo de um período de 50 anos, o que conduziu uma probabilidade de colapso na ausência de deterioração $p_f = 1.64 \times 10^{-7}$ (índice de fiabilidade $\beta = 5.11$). A fiabilidade da estrutura nos primeiros anos é condicionada pelos elementos 1 e 2 (linha), mas com a deterioração a fiabilidade da estrutura depende do elemento 3 (perna esquerda). Neste caso, a fiabilidade depende significativamente do CoV da taxa de deterioração, podendo atingir uma $p_f = 5.75 \times 10^{-2}$ ($\beta = 1.58$) após 50 anos. A evolução do índice de fiabilidade e da probabilidade de colapso ao longo do tempo para diferentes CoVs da taxa de deterioração está ilustrada na Figura 5, onde se verifica que a partir do momento que a deterioração começa a influenciar a fiabilidade da estrutura, a probabilidade de colapso aumenta quase exponencialmente. À medida que a deterioração aumenta, a redução da secção transversal no elemento afetado conduz também a tensões elevadas nos elementos adjacentes.

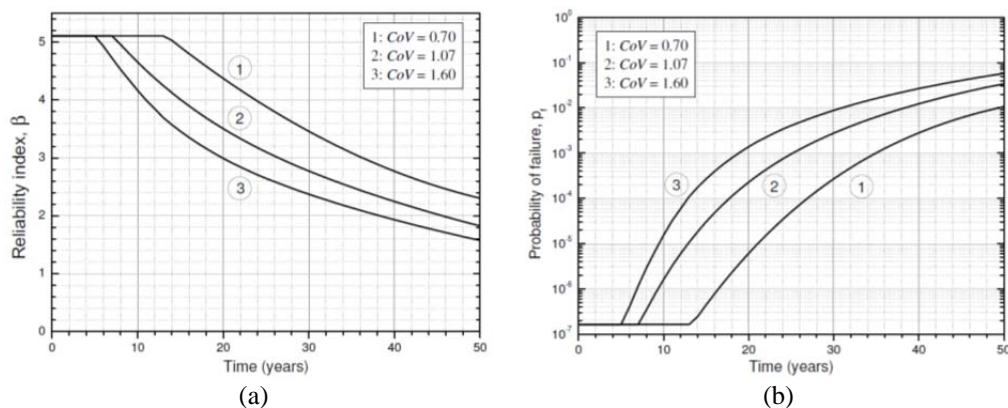


Figura 5 – Evolução do (a) índice de fiabilidade e (b) probabilidade de colapso para diferentes coeficientes de variação da taxa de deterioração, e um período de 50 anos

O comportamento observado, com aumento progressivo da probabilidade de colapso nos elementos vizinhos de elementos afetados é também observado em estruturas reais, demonstrando que o modelo é capaz de detetar rearranjos internos de esforços. Observa-se ainda que, para a estrutura analisada e uma idade de 50 anos, todos os modelos apresentam um índice de fiabilidade inferior a 2.4, o que parece notoriamente excessivo quando se compara com estruturas reais. O modelo adotado não considera qualquer manutenção ou reparação, que muitas vezes se verificam, sendo também provável que a taxa de deterioração adotada seja demasiado elevada. Se assumirmos um índice de fiabilidade mínimo de 3.3 para um horizonte de 50 anos, é possível resolver o problema inverso e obter as taxas de deterioração aceitáveis.

A calibração realizada permitiu obter para um CoV de 1.07, os seguintes valores de deterioração: $r_{Lateral} = 0.079$ mm/ano; $r_{Superior} = 0.237$ mm/ano e $r_{Inferior} = 0.119$ mm/ano.

3. CASOS DE ESTUDO

3.1. Salão das Audiências, Câmara Municipal de Arcos de Valdevez

Neste caso de estudo surgiram dúvidas sobre a capacidade resistente de um pavimento em madeira. Para responder a estas dúvidas foi realizado um ensaio de carga para uma sobrecarga de utilização de 3 kN/m^2 , ver [4] para detalhes. O vigamento de carvalho do pavimento tem um vão de cerca de 6.5 m, ver Figura 6, sendo realizado com um conjunto de vigas principais, a cada 0.70 m, um conjunto de vigas secundárias apenas na zona próxima da fachada principal e um conjunto de vigas transversais colocadas a cada 0.46 m. Por cima das vigas transversais foram colocadas placas de MDF com 24 mm de espessura e 10 cm de betão leve como camada de forma. Estas alterações aumentaram o peso próprio do pavimento para o triplo.

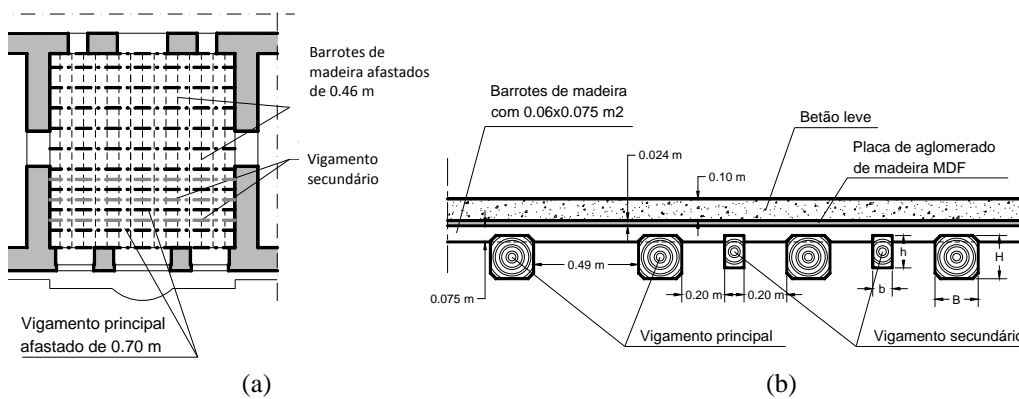


Figura 6 – Estrutura do pavimento: (a) planta; (b) secção transversal

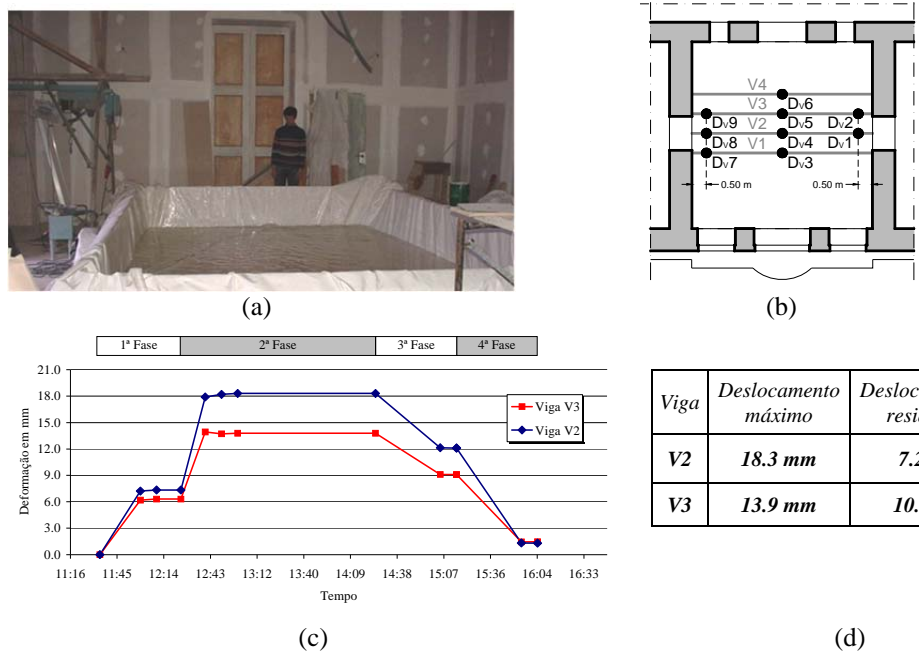


Figura 7 – Ensaio de carga: (a) reservatório de água para aplicação de carga; (b) localização dos transdutores de deslocamento; (c) resposta dos transdutores ao longo do tempo; (d) deslocamentos máximos e residuais

A madeira da estrutura está em bom estado e não apresenta dano estrutural, apesar de se verificar algum ataque por insetos xilófagos. De acordo com uma análise de estabilidade prévia, a segurança da estrutura seria insuficiente pelo que foi decidido proceder à realização de um ensaio de carga. O ensaio foi efetuado com um reservatório de água, ver Figura 7a,b, utilizando nove transdutores de deslocamento para controlo da resposta. O ensaio de carga foi realizado em quatro fases: (a) 50% da ação total; (b) 100% da ação total; (c) descarga até 50% da ação total; (d) descarga total. Cada etapa de carga demorou entre 25 e 40 minutos, conduzindo a um total de ensaio de cinco horas, incluindo o tempo de decisão sobre a etapa seguinte. Após completar os ensaios, verificaram-se deslocamentos residuais em todos os transdutores, como habitual. A Figura 7c,d ilustra a resposta de flexão das vigas V2 e V3, sendo o deslocamento máximo da viga V2 de 18.3 mm. Este valor deveria ser inferior a $1/300$ do vão para carregamentos de curta duração (21 mm). O deslocamento residual médio obtido é de 9%, que é muito razoável para este tipo de estrutura pelo que o pavimento pode ser utilizado para uma sobrecarga de utilização de 3 kN/m^2 , em qualquer reforço.

3.2. Igreja de Nossa Senhora da Conceição, Braga

Neste caso pretendia-se avaliar as condições de segurança de um pavimento de uma igreja cujas condições de uso iriam ser alteradas (de um coro fechado ao público para um museu), ver [5] para detalhes. O pavimento está localizado num igreja que data de 1625 e apresenta deformação considerável. O vão do pavimento é de dimensão apreciável (cerca de 9.15 m) e a estrutura é composta dos seguintes elementos: (a) um conjunto de vigas principais, afastadas de 3.40 m; (b) um conjunto de vigas secundárias, perpendiculares às vigas principais, a uma distância de 0.50 m; (c) um conjunto de vigas transversais com menor secção que dão apoio ao pavimento; (d) um conjunto de escoras metálicas, localizadas aos terços do vão das vigas principais, ver Figura 8a.

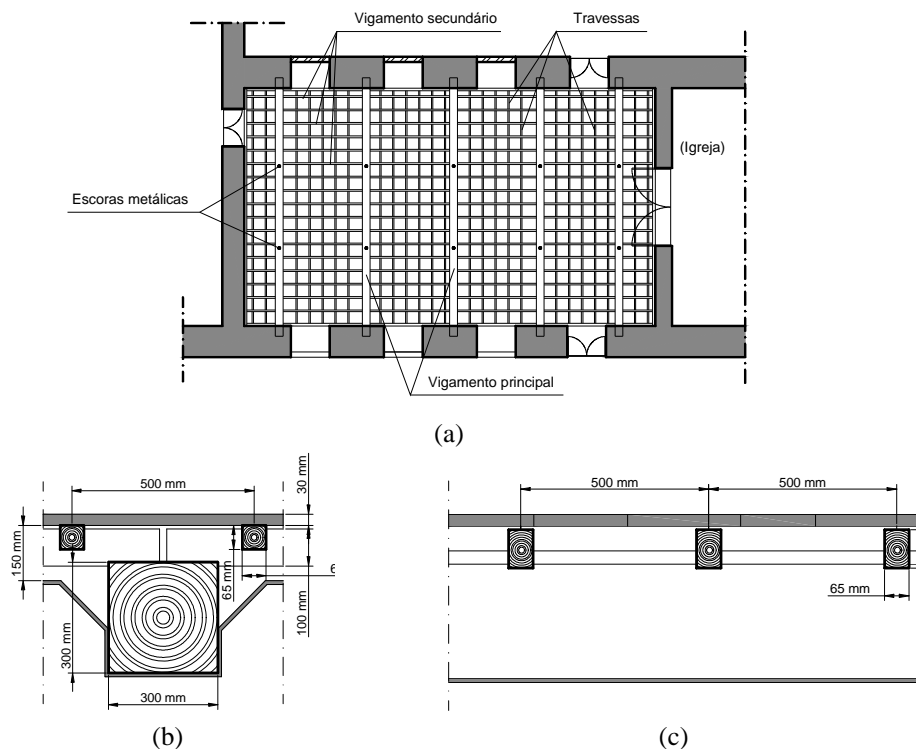


Figura 8 – Estrutura do pavimento: (a) planta; (b) secção transversal das vigas principais; (c) secção transversal das vigas secundárias

As vigas principais têm uma secção transversal quadrada com lado de 300 mm, tal como de ilustra na Figura 8b, enquanto as vigas secundárias tem uma secção retangular com 65

$\times 100 \text{ mm}^2$ (ver Figura 8c). As vigas transversais são também quadradas, com uma secção transversal de $65 \times 65 \text{ mm}^2$. O soalho tem uma espessura de 30 mm. Todos os elementos são de castanho, com exceção das vigas transversais que são em eucalipto e foram colocadas recentemente, e parte do soalho, em pinho, que foi parcialmente substituído. Uma inspeção visual combinada com o resistógrafo permitiu verificar que a estrutura de madeira estava em bom estado, com exceção de uma viga e do soalho. A estrutura foi analisada, tendo sido concluído que as vigas principais, as vigas secundárias e as escoras metálicas são insuficientes para resistir a uma sobrecarga de utilização de 3 kN/m^2 . Para definição de uma solução de reforço considerou-se a necessidade de manter os materiais existentes e não remover o teto policromado sob o soalho do pavimento. Foram consideradas as seguintes possibilidades de reforço: (a) adicionar um perfil metálico à viga principal, criando um perfil misto, retirando as escoras metálicas existentes e recuperando parte da deformação instalada; (b) colocação de novos pilares metálicos aos terços do vão. Em ambos os casos, as vigas secundárias existentes seriam duplicadas, uma vez que a sua secção é manifestamente insuficiente.

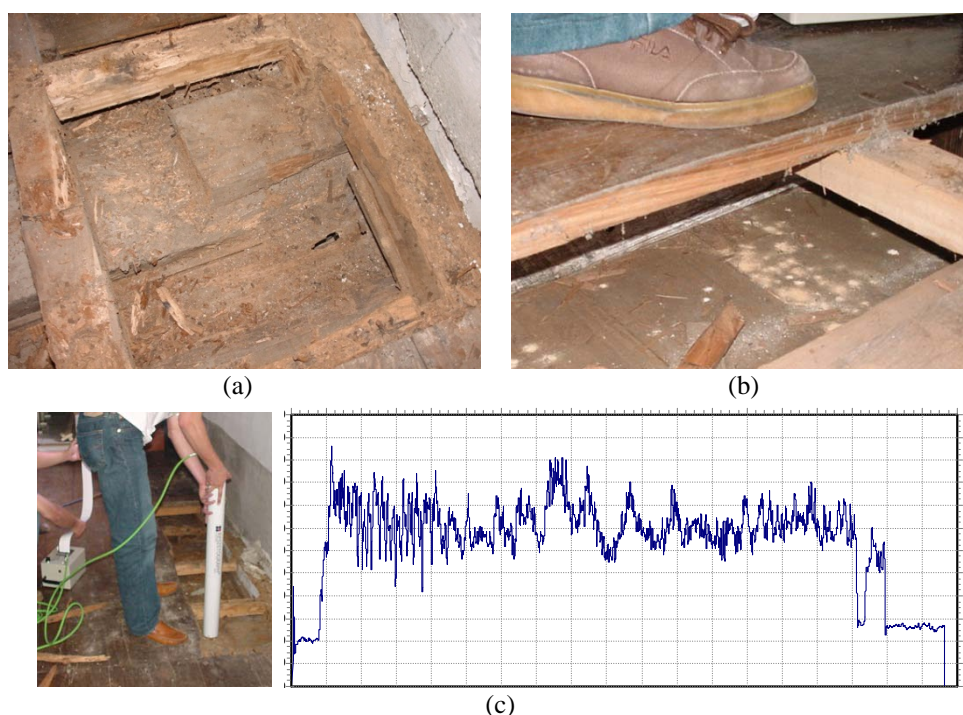


Figura 9 – Detalhes acerca do estado da madeira: (a) junto ao apoio de uma viga deteriorada; (b) ataque biológico junto do soalho; (c) resultados do resistógrafo

3.3. Igreja de Nossa Senhora da Oliveira, Guimarães

Neste caso pretendia-se recuperar o coro alto de um igreja para colocação de um órgão, tendo-se verificado no passado diversas anomalias que impediram a sua utilização, ver [6] para detalhes. Tendo em consideração o estado de conservação do soalho e das vigas secundárias de madeira, procedeu-se ao dimensionamento de novos elementos em Pinho Bravo da Classe E). A solução de reforço do pavimento inclui o reforço de duas vigas principais localizadas no centro do pavimento com chapas metálicas laterais e a aplicação de quatro novas vigas principais de secção mista na zona central do pavimento. Além de garantidos os critérios em Estado Limite Último, esta solução de reforço permite ainda garantir deformações muito reduzidas do pavimento, necessárias ao bom funcionamento do órgão.

O desmonte do soalho do pavimento permitiu definir com rigor a geometria da estrutura (Figura 10). A estrutura metálica é constituída por três pórticos metálicos paralelos e por cinco vigas que suportam o vão em consola. O soalho (espessura igual a 2.5 cm) assenta sobre um

conjunto de vigas principais e secundárias em madeira dispostas, aproximadamente, em direções ortogonais. As vigas de suporte do soalho apresentam dano, com descontinuidades e redução de secção transversal, em particular as vigas secundárias. O pavimento de madeira estará sujeito a um carregamento adicional devido ao novo órgão. Além disso, o bom desempenho deste instrumento musical apenas está garantido para deformações reduzidas. Tendo em consideração o estado de conservação das vigas secundárias e do soalho, admitiu-se que estes seriam substituídos por novos elementos de madeira, mantendo-se apenas as vigas principais (ortogonais ao pórticos metálicos). Estimou-se que o peso total do órgão sobre o pavimento é igual a 6 toneladas distribuído numa base com área a igual a $1.8 \times 2.0 \text{ m}^2$.

A distribuição do peso do órgão aos pórticos metálicos é realizada através de seis vigas principais de secção mista (madeira e aço), consideradas como simplesmente apoiadas (ver Figuras 11 e 12). A secção transversal de madeira das vigas mistas VPM3, VPM4 e VPM5 é igual a $0.11 \times 0.16 \text{ m}^2$ e são reforçadas com duas chapas laterais (S275) com espessura igual a 10 mm. A deformação instantânea destas vigas é igual a 1.80 mm. A secção transversal de madeira das vigas mistas VPM10, VPM11 e VPM12 é igual a $0.075 \times 0.145 \text{ m}^2$ e são reforçadas com duas chapas laterais (S275) com espessura igual a 4 mm. A deformação instantânea destas vigas de secção mista é igual a 0.91 mm.



Figura 10 – Pavimento do coro alto após desmonte do soalho

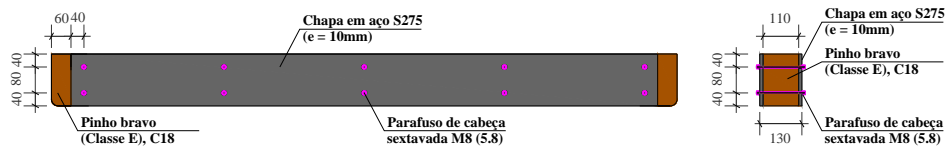


Figura 11 – Vigas mistas aço-madeira VPM3 a VPM5. (Dimensões em milímetros)

3.4. Cobertura do Mosteiro de Santa Cruz, Coimbra

O Mosteiro de Santa Cruz, foi fundado em 1131 no exterior das muralhas de Coimbra, sendo a mais importante casa monástica nos primeiros tempos da monarquia portuguesa. A sala do relicário, é uma das zonas contíguas do Mosteiro de Santa Cruz, possuindo originalmente uma cobertura em madeira com quatro águas e, no seu interior, uma abóbada principal de madeira fasquiada e estucada, com forma elíptica, e diversas abóbadas secundárias de madeira fasquiada e estucada, com forma de berço. A sala do relicário possui dimensões aproximadas de 12.5 m de largura, 15.0 m de comprimento e 11.5 m de altura (medida ao fecho da abóbada). Com a entrada de água da cobertura e com o aumento da deformação da estrutura da cobertura, foram sendo introduzidas escoras e apoios diversos, incluindo ligações à abóbada fasquiada. A deformação continuada do sistema causou inversão da curvatura da abóbada principal e fendilhação considerável. Para uma análise mais cuidada do estado de conservação das madeiras, realizaram-se vários ensaios não destrutivos, recorrendo ao Pilodyn®, ao Resistograph®, à escarificação e a uma inspeção visual.

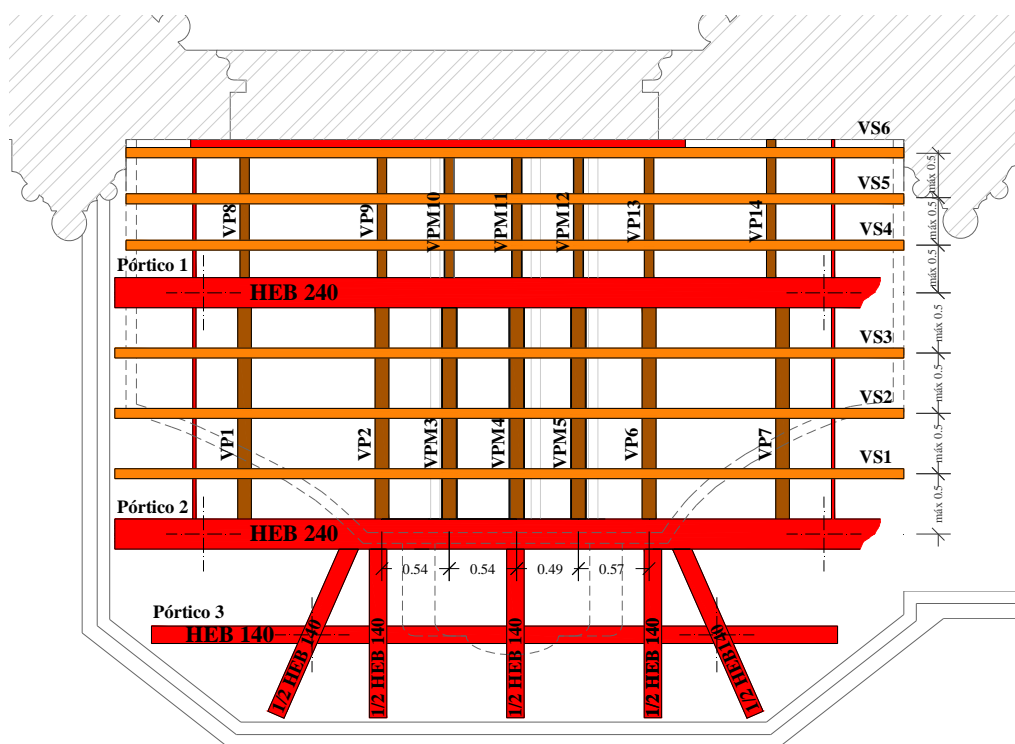


Figura 12 – Planta do vigamento do pavimento do coro alto. VP: Viga Principal; VPM: Viga Principal Mista; VS: Viga Secundária. Dimensões em metros

Para a cobertura de madeira, foram analisadas duas soluções possíveis [7]: (a) manter a estrutura original, utilizando “mãos de amigo” realizadas com novas vigas de eixo curvilíneo apoiando nas paredes exteriores ou (b) realização de uma nova estrutura de madeira. Dado o muito elevado nível de deformação da estrutura, o apoio generalizado da cobertura sobre a abóbada interior e respetivo dano induzido já com inversão da curvatura da abóbada, e tomando em consideração o facto das intervenções anteriores não terem conseguido sustentar o processo de degradação, optou-se por substituir a cobertura existente.

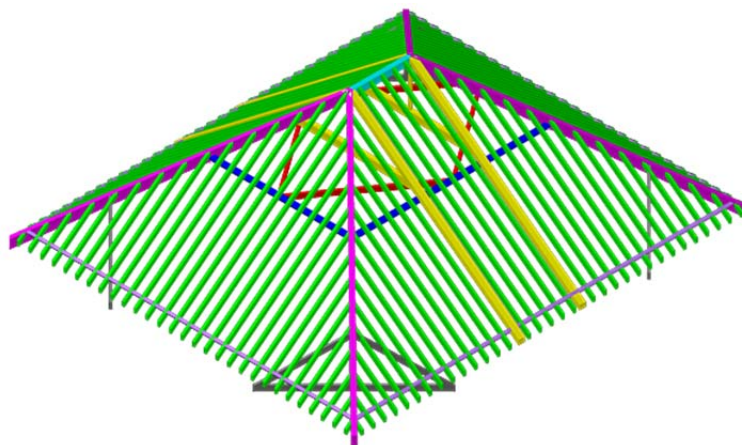


Figura 13 – Modelo 3-D da cobertura realizada

A nova estrutura foi dimensionada globalmente em madeira maciça de pinho bravo, recorrendo-se ao abeto, no caso em que as peças de pinho, pela sua elevada dimensão, não estivessem disponíveis no mercado. Foram analisadas propostas alternativas em madeira lamelada colada, cujos preços se revelaram não competitivos nesta obra. Salienta-se que a presença da abóbada inviabilizava a realização de uma estrutura de cobertura tradicional,

recorrendo por exemplo a asnas planas, pois era impossível a colocação de uma linha. As dimensões em planta e altura da cobertura assumem valores significativos, o que associado à impossibilidade de realizar apoios interiores, conduziram a uma solução que consiste numa estrutura composta por quatro diagonais, duas asnas principais com linhas sobrelevadas, quatro terças com um esquadro de reforço, cumeeira e quatro asnas de canto, ver Figura 13. Sobre este sistema apoia um conjunto de madres com secção significativa, que servem de suporte ao forro em madeira.

Os apoios da cobertura na viga-cinta de betão armado são realizados apoiando as peças em nichos na estrutura original e interpondo tacos de neoprene, enquanto as asnas de canto apoiam em aparelhos de aço inoxidável criados para o efeito, assegurando-se a conveniente ventilação. As ligações entre as várias peças foram pregadas ou aparafusadas usando chapas de aço inoxidável. Sobre o forro de madeira foi colocada uma subtelha estanque tipo ONDULINE e telha cerâmica de canal e capa, aparafusada sobre ripas de PVC face à elevada inclinação do telhado. A cumeeira foi realizada a seco, permitindo-se a ventilação do interior da cobertura, a ventilação do forro e a ventilação das telhas. Na Figura 14 apresentam-se diferentes aspetos da execução da obra.



Figura 14 – Detalhes da execução: (a) nova estrutura principal da cobertura; (b) asnas de canto; (c) madres e colocação do forro; (d) cobertura em fase de conclusão

3.5. Coberturas da Sé do Porto

A origem da Sé do Porto data do séc. XII, tendo sido realizados trabalhos extensos de conservação na última década. Os trabalhos na cobertura incluíram a aplicação de produtos de preservação, a limpeza e a reparação local, tendo sido possível manter a generalidade das estruturas existentes em madeira, ver Figura 15.



Figura 15 – Detalhes da execução: (a) cobertura durante e após a execução dos trabalhos; (b) detalhes da estruturas e reparações locais; (c) detalhes dos beirais e subtelha

4. CONCLUSÕES

Apresentou-se investigação recente tendo em vista aplicar técnicas de fiabilidade na avaliação de segurança de estruturas de madeira, permitindo estimar de forma mais adequada o nível de segurança existente. Apresentaram-se ainda casos de estudo em estruturas de madeira em Portugal. Depois de um período recente em que as estruturas de madeira eram substituídas por estruturas de betão ou aço, a prática atual é a conservação das estruturas existentes de madeira.

A combinação do conhecimento sobre técnicas de inspeção, diagnóstico e avaliação de segurança permitem esta nova abordagem, tal como se verificou nos casos de estudo apresentados.

5. REFERÊNCIAS

- [1] ICOMOS – *Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico*. International Council on Monuments and Sites, 2004. <http://hdl.handle.net/1822/3172>.
- [2] Brites, R., Avaliação de segurança das estruturas antigas de madeira, *Tese de Doutoramento*, Universidade do Minho, 2011. <http://hdl.handle.net/1822/14069>.
- [3] Wang, C., Leicester, R. H., Nguyen, M., Probabilistic procedure for design of untreated timber poles in-ground under attack of decay fungi. *Reliability Engineering and System Safety*, 93, 476–481, 2008.
- [4] Ramos, L.F., Lourenço, P.B., 2003, Verificação da estabilidade de um pavimento da Câmara Municipal de Arcos de Valdevez, *Relatório 03-DEC/E-1*, Universidade do Minho.
- [5] Ramos, L.F., Lourenço, P.B., 2003, Diagnóstico, inspeção e reforço do pavimento do coro da Igreja da Conceição, em Braga, *Relatório 03-DEC/E-24*, Universidade do Minho.
- [6] Lourenço, P.B., Mendes, N., Igreja de Nossa Senhora da Oliveira, Guimarães: Avaliação da estabilidade da estrutura do coro alto (2ª Fase), *Relatório 12-DEC/E-03*, Universidade do Minho, Guimarães, pp. 11 (2012)
- [7] Lourenço P.B., Feio A.O., Branco J.M., Projeto de intervenção na sala do relicário da igreja de Santa Cruz, Coimbra. *Relatório 03-DEC/E-20*, Universidade do Minho, 17 pp., 2003.