

AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE MADEIRA ATRAVÉS DE ANÁLISE PROBABILÍSTICA



Hélder Sousa

*Aluno de doutoramento
Universidade do Minho
Guimarães
hssousa@civil.uminho.pt*



Paulo Lourenço

*Professor Catedrático
Universidade do Minho
Guimarães
pbl@civil.uminho.pt*



Luís Neves

*Professor Auxiliar
Universidade Nova de Lisboa
Lisboa
lacn@fct.unl.pt*

SUMÁRIO

O presente trabalho apresenta diferentes modelos geométricos e mecânicos na definição de parâmetros probabilísticos de avaliação de segurança para estruturas existentes em madeira, influenciadas por diferentes acções e atendendo a modelos de degradação. O caso de estudo é referente às asnas do Laboratório Chimico, em Coimbra, tendo a avaliação de segurança sido analisada através da técnica de simulação de Monte Carlo.

Palavras-chave: fiabilidade, madeira, modelos de degradação.

1. INTRODUÇÃO

A madeira tem sido usada, como material estrutural, desde há milhares de anos, em várias construções em todo o continente Europeu. Como resultado, chegaram, até ao presente, inúmeras estruturas de acrescido valor histórico ou social. No entanto, algumas apresentam degradação que limita as suas capacidades de uso. O objectivo deste trabalho é descrever o uso de metodologias simplificadas de análise probabilística para análise de segurança de estruturas antigas em madeira. Na avaliação de segurança de estruturas existentes em madeira, as metodologias probabilísticas apresentam em relação às técnicas semi-

probabilísticas, baseadas em factores parciais de segurança, uma utilidade acrescida pois permitem incorporar de forma mais precisa as incertezas inerentes a este tipo de estruturas e material. Uma análise probabilística mais detalhada poderá mesmo vir a definir uma estrutura como segura mesmo quando esta não satisfaz os requisitos dos regulamentos. A madeira é um material relativamente complexo, devido ao seu comportamento anisotrópico e da relação do seu comportamento com a duração da acção e do valor do teor em água. Apesar de resistente a ataques químicos, a madeira é um material susceptível a degradação biológica, causada tanto por fungos como insectos, sendo isto particularmente relevante em climas mais quentes, tais como os presentes no Sul da Europa.

No presente trabalho, a segurança de asnas tradicionais em madeira é analisada durante o seu ciclo de vida completo, considerando probabilisticamente o efeito de degradação. A segurança da estrutura é definida pelo índice de fiabilidade do sistema, considerado diferentes modelos geométricos.

A metodologia proposta foi aplicada a uma cobertura em madeira localizada em Coimbra. A estrutura foi recentemente demolida, pois apresentava sinais de degradação biológica significativos, que levaram a determinar a estrutura insegura do ponto de vista de uma análise semi-probabilística. No entanto, as inspecções realizadas fornecem informação suficiente para uma análise probabilística, conforme se apresenta aqui.

2. ANÁLISE DE FIABILIDADE

Uma análise de fiabilidade requer, em analogia com as abordagens semi-probabilísticas, a definição das propriedades resistentes assim como dos efeitos das acções, mas ao contrário destas, a análise de fiabilidade incorpora informação probabilística mais detalhada que permite a computação de parâmetros avaliadores da segurança da estrutura, tais como a probabilidade de rotura e índice de fiabilidade.

2.1 Modelo de resistência

Neste trabalho, a resistência é modelada considerando as regras descritas no Eurocódigo 5 (EC5) [1], com as adaptações necessárias para uma análise probabilística, atendendo a efeitos de primeira e segunda ordem. A verificação de segurança e consequentes margens de segurança são posteriormente calculadas tendo em conta a resistência estrutural e as acções actuantes.

Os modelos probabilísticos utilizados para as propriedades fundamentais da madeira são propostos no Joint Committee for Structural Safety Model Code (JCSS) [2]. Estas propriedades dizem respeito à resistência e ao módulo de elasticidade da madeira em flexão, compressão e tracção, sendo que a resistência à flexão e o módulo de elasticidade são definidos como parâmetros chave. Distribuições do tipo lognormal são propostas para a resistência à flexão e para o módulo de Young, com coeficientes de variação iguais a 25% e 13%, respectivamente. Neste trabalho, a definição de cada uma destas variáveis aleatórias teve também em conta os valores médios e coeficientes de variação de acordo com testes não destrutivos realizados [3].

Considerando o modelo dado pelo JCSS [2], as outras propriedades da madeira podem ser definidas tendo por base as propriedades chave através de expressões empíricas, apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Relação entre propriedades chave (sombreadas) e outras propriedades [2]

Propriedade, X	Distribuição	Valor esperado, E[X]	Coef. de Variação, CoV[X]
Resistência à flexão, f_m	Lognormal	E [f_m]	0.25
Módulo de elasticidade à flexão, E_m	Lognormal	E [E_m]	0.13
Densidade, ρ_m	Normal	E [ρ_m]	0.10
Resistência à tracção paralela ao fio, $f_{t,0}$	Lognormal	0.6 E [f_m]	1.2 CoV [f_m]
Resistência à tracção perpendicular ao fio, $f_{t,90}$	Weibull	0.015 E [ρ_m]	2.5 CoV [ρ_m]
ME – tracção paralela ao fio, $E_{t,0}$	Lognormal	E [E_m]	CoV [E_m]
ME – tracção perpendicular ao fio, $E_{t,90}$	Lognormal	E [E_m]/30	CoV [E_m]
Resistência à compressão paralela ao fio, $f_{c,0}$	Lognormal	5 E [f_m] ^{0.45}	0.8 CoV [f_m]
Resistência à compressão perpendicular ao fio, $f_{c,90}$	Normal	0.008 E [ρ_m]	CoV [ρ_m]
Módulo ao corte, G_v	Lognormal	E [E_m]/16	CoV [E_m]
Resistência ao corte, f_v	Lognormal	0.2 E [f_m] ^{0.8}	CoV [f_m]

A análise do EC5 [1] define três classes de serviço diferentes para estruturas de madeira dependendo do teor em água do material, temperatura e humidade relativa do ar. Tendo por base essas classes de serviço e duração da carga é aplicado um parâmetro determinístico, usualmente denominado por k_{mod} , que irá afectar os valores de projecto da resistência da estrutura ou elementos de madeira. O material em causa também afecta o parâmetro k_{mod} , sendo que construções antigas são construídas maioritariamente em madeira sólida.

2.2 Geometria

A alteração de geometria em elementos de madeira, sujeitos a ataque biológico, é maioritariamente consequência de degradação por ataque de insectos xilófagos e fungos de podridão. Este processo de degradação começa com a destruição das áreas junto ao perímetro da secção transversal que posteriormente progride até ao seu interior. A redução da secção geométrica é o único efeito causado pois, ao contrário do que ocorre noutros materiais, as propriedades mecânicas das áreas intactas não são afectadas. A degradação de elementos de madeira pode apresentar diferentes níveis de intensidade ao longo de uma estrutura, podendo existir secções com perdas significativas juntas de outras quase intactas. No entanto, a calibração de um modelo espacial da variação de geometria através de dados obtidos por inspecção visual ou por ensaios laboratoriais é complexa e consome demasiado tempo. Neste trabalho são definidos diferentes cenários para a modelação geométrica de estruturas de madeira degradadas com o objectivo de definir um método simples mas preciso. Atendendo à disponibilidade de dados obtidos em inspecção *in situ* [3], quatro modelos diferentes foram utilizados para caracterizar as secções transversais. Inicialmente a secção degradada foi considerada como tendo uma contribuição nula para a resistência. Os três primeiros modelos consideraram uma abordagem determinística para as dimensões das secções transversais, dadas pelo: (i) valor observado em diferentes secções; (ii) média dos

valores observados para cada elemento, onde foi considerado que a redistribuição de esforços permitiria a eliminação do efeito de elementos mais degradados, e (iii) mínimo dos valores observados para cada elemento, considerando um cenário de rotura frágil após a rotura do primeiro elemento. No quarto modelo as dimensões da secção transversal são definidas como variáveis aleatórias.

2.3 Acções

A actuação de acções permanentes e do vento foram consideradas neste trabalho. A acção permanente foi modelada por uma distribuição normal, com média igual ao valor nominal. O coeficiente de variação depende da incerteza existente sobre a geometria da estrutura e peso de elementos não estruturais sendo um usual um valor de 10% para o coeficiente de variação [4]. A intensidade da acção do vento depende da localização e geometria da estrutura. Uma distribuição de Gumbel pode ser utilizada para descrever esta acção com um coeficiente de variação de 40% [5]. O valor médio para a acção do vento pode ser definido baseado no valor nominal definido no Eurocódigo 1 [6]. Os esforços presentes na estrutura podem então ser calculados considerando uma análise elástica linear, baseada num método de elementos finitos, atendendo à simplicidade geométrica da maioria das estruturas de madeira e do seu comportamento elástico e frágil. Para esse efeito foi considerado a actuação exclusiva do peso próprio (*Combinação P*), assim como a actuação conjunta dessa acção com a acção do vento em ambas os sentidos (*Combinação PV1* e *Combinação PV2*), perfazendo um total de três combinações de acções.

3. CASO DE ESTUDO

3.1 Asnas em madeira do Laboratório Chimico

O Laboratório Chimico, exemplo do Neoclássico Português do séc. XVIII, localizado na Universidade de Coimbra serviu de laboratório para o ensino e investigação da época. A ala 1 desse edifício é composta por uma cobertura em madeira de três águas e a sua estrutura inicial consistia de quatro asnas com 14.20 m de vão livre. Após inspecção realizada a estas aquando a construção do Museu da Ciência, foi considerado necessário proceder à sua substituição.

3.2 Modelação da estrutura

Tendo em conta o esquema estrutural simples das asnas, estas foram modeladas através de uma estrutura plana bidimensional com os elementos biarticulados. Nas extremidades inferiores das pernas foram considerados apoios duplos, tendo em conta a existência de um tirante metálico que unia as pernas nesses pontos. Na definição das restantes ligações metálicas verificou-se que o nível de rigidez destas, neste caso de estudo, não era significativo no cálculo dos esforços actuantes, sendo assim mantido o modelo de elementos biarticulados. Atendendo às inspecções realizadas foram definidas dimensões geométricas resistentes para os modelos estruturais (ver Fig. 1). Para definição das propriedades

mecânicas do material foram assumidos os valores médios da tensão de rotura à flexão de 25 MPa, um módulo de elasticidade à flexão de 12 GPa e uma densidade de 500 kg/m³.

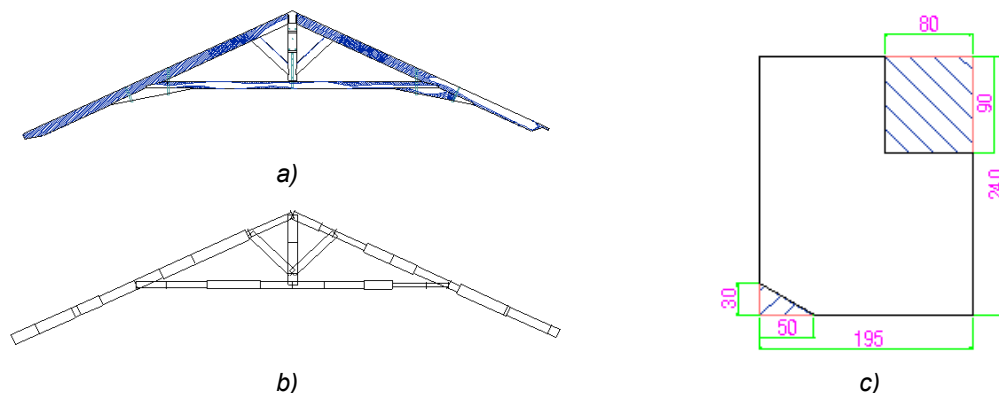


Figura 1. Exemplo de uma asna inspeccionada (degradação a tracejado): a) esquema de degradação [3]; b) modelo geométrico estrutural; c) uma secção da linha [mm]

3.3 Modelos de secção transversal determinística

Na avaliação de segurança uma técnica de simulação de Monte Carlo foi utilizada, mantendo inicialmente as dimensões das secções transversais como parâmetros determinísticos. Para situações em que probabilidades de rotura muito baixas eram expectáveis, através da determinação da distribuição probabilística das margens de segurança, aproximou-se o efeito das acções e a resistência a variáveis normais, de modo a reduzir o número de amostras necessário. Os diferentes valores de fiabilidade para cada asna são apresentados no Quadro 2, onde se verifica que os valores para a *Combinação P* são os mais desfavoráveis em termos de segurança, sendo isto principalmente associado ao uso de um valor inferior de k_{mod} nessa combinação.

3.3.1 Secção transversal definida pelos valores observados

Devido ao seu nível de degradação é verificado que as asnas 1 e 2 apresentam índices de fiabilidade que não garantem condições de segurança satisfatórias, no entanto para este mesmo modelo e para estes agentes patológicos, as asnas 3 e 4 são consideradas seguras. Os valores de índice de fiabilidade, apesar de coerentes com os diferentes níveis de degradação de cada asna, são no entanto demasiado baixos para as asnas 1 e 2 pois estas ainda mantinham a sua integridade estrutural aquando a realização dos testes não destrutivos. Isto denota que parte da secção degradada por insectos xilófagos e fungos de podridão ainda contribui para a resistência global da estrutura.

Como o fenómeno de degradação leva a uma redução da secção considerada e consequente aumento da esbelteza dos elementos, o modo de rotura predominante correspondeu à violação da função de estado limite último para verificação à encurvadura.

3.3.2 Secção transversal definida pelo valor médio de cada elemento

A eliminação de secções transversais muito degradadas causada pela consideração do valor médio de cada elemento levou, como expectável, ao aumento dos índices de fiabilidade quando comparados com a análise realizada no modelo de secção transversal definida pelos valores observados. No entanto, a comparação global entre asnas é mantida, sendo que as asnas 1 e 2 são, ainda, as que proporcionam menores índices de fiabilidade.

Quadro 2. Índices de fiabilidade para modelos de secção transversal determinística e diferentes combinações de acções.

Asna	Valores observados			Valor médio por elemento			Valor mínimo por elemento		
	P	PV1	PV2	P	PV1	PV2	P	PV1	PV2
1	-1.374	0.905	-0.356	2.208	3.771	3.341	-Inf	-Inf	-Inf
2	-2.435	-1.231	0.140	1.171	2.238	3.504	-2.578	-1.348	-0.279
3	3.917	5.962	5.039	5.186	6.509	6.032	3.284	5.091	4.341
4	4.184	4.942	7.066	3.985	4.768	5.605	-2.808	-1.200	-0.291

3.3.3 Secção transversal definida pelo valor mínimo de cada elemento

Neste modelo, os valores obtidos mostram que as asnas 1 e 2 são extremamente inseguras e que a asna 4 apresenta agora também sinais de insegurança. Os valores de fiabilidade para a asna 1 são extremamente conservativos pois indicam que a estrutura irá colapsar apesar desta ainda manter a sua integridade estrutural aquando a realização dos testes não destrutivos. Os índices de fiabilidade da asna 3 são ainda aceitáveis pois esta não apresentava secções transversais críticas.

3.4 Variação da secção transversal residual

A hipótese de considerar nula a contribuição de áreas degradadas para a resistência global da secção transversal, demonstrou ser demasiadamente conservativa, em particular para as duas asnas mais degradadas (asnas 1 e 2). Dessa forma, a consideração de um factor de capacidade restante para as áreas degradadas parece ser adequada, sendo este considerado, neste trabalho, através de:

$$A_f = A_{ND} + \alpha \cdot A_D \quad (1)$$

onde α é o factor de capacidade restante (com limite máximo de 50%), A_f é a secção transversal residual para cada elemento, A_{ND} é a área que não foi afectada por insectos xilófagos nem por fungos de podridão, A_D é a área atacada por qualquer um dos agentes patológicos. O modelo considerado corresponde ao modelo determinístico e valores observados para as secções transversais. A evolução do índice de fiabilidade em relação ao

factor de capacidade restante é apresentada na Fig. 2, para uma das asnas mais degradadas (asna 1) e outra em estado de degradação menos elevado (asna 3).

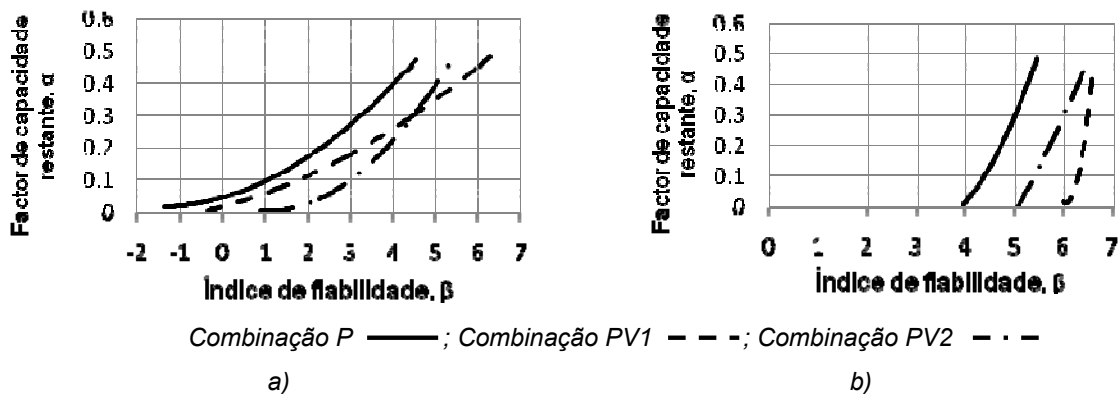


Figura 2. Evolução de β com o factor de capacidade restante, α : a) asna 1; b) asna 3

Atendendo aos valores obtidos, é concluído que o coeficiente α é mais influente para as asnas mais degradadas pois o valor de A_D é maior. Para as asnas menos degradada a contribuição do coeficiente α é menos significativa porque o valor de A_D é pequeno e portanto o incremento de secção transversal residual é menor. Sabendo que as asnas em madeira mantinham a sua integridade estrutural aquando da realização dos ensaios não destrutivos, é aceitável assumir que os índices de fiabilidade dessas asnas são positivos, no entanto não é adequado assumir valores muito superiores a 0, tendo em conta o elevado estado de degradação encontrado e os valores obtidos anteriormente nos diferentes modelos geométricos determinísticos. Para o estudo do caso mais desfavorável (asna 2 e *Combinação P*) um valor de α perto de 25% provou ser adequado no processo de avaliação de segurança dessa estrutura.

3.5 Modelo de secção transversal probabilística

Um modelo probabilístico para definição das secções transversais foi também considerado com valor médio dado pela média dos valores observados para cada elemento, um coeficiente de variação de 10% e uma distribuição lognormal. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Índices de fiabilidade para modelo de secção transversal probabilística.

Asna	P	PV1	PV2
1	1.281	2.671	2.307
2	0.528	1.359	2.528
3	3.641	4.785	4.466
4	2.774	3.752	3.999

Comparando os valores obtidos com os apresentados no modelo de secção transversal determinística dada pela média dos elementos, é verificado que o uso de variáveis probabilísticas para as dimensões das secções transversais diminui o valor do índice de fiabilidade em todos os casos. Isto ocorre principalmente porque a consideração de uma nova variável aleatória introduz incertezas no problema. No entanto, como a resistência de elementos de madeira varia ao longo da sua extensão as características geométricas das asnas são melhor definidas pela consideração deste parâmetro como probabilístico. A inclusão deste modelo de secção transversal probabilística apresenta, para a asna mais degradada, índices de fiabilidade similares aos obtidos quando considerado um coeficiente α igual a 25%.

3.6 Variação do parâmetro k_{mod}

Nas combinações onde a acção do vento era considerada foi utilizado um valor de k_{mod} superior à combinação onde somente se consideraram as acções permanentes. Disto resultou que a consideração de uma nova acção variável com duração menor levasse ao aumento dos índices de fiabilidade. Tendo em conta esta situação, deverá ser considerada uma forma diferente de definir um factor k_{mod} adequado.

Neste trabalho foi proposto atribuir valores diferentes de k_{mod} para cada tipo de acção no cálculo da função de estado limite último e posteriormente calcular a margem de segurança inerente, conforme descrito na Eq. (2).

$$M = I - \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_i}{S_i} + \frac{R_2}{S_2} + \dots + \frac{R_n}{S_n} \right) \quad (2)$$

onde cada R_i e S_i correspondem, respectivamente, à resistência e aos efeitos das acções de um determinado tipo de acção com o valor de k_{mod} associado. Os resultados são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Índices de fiabilidade para modelos de secção transversal determinística e probabilística com factores k_{mod} diferentes para cada acção.

Asna	Determinística		Probabilística	
	PV1	PV2	PV1	PV2
1	-1.152	-1.894	1.385	1.120
2	-2.808	-1.894	0.118	0.792
3	4.225	3.382	3.558	3.294
4	3.430	5.028	2.638	3.190

Seguindo esta metodologia e comparando com o modelo geométrico determinístico com valores observados para as secções transversais e com o modelo probabilístico, é possível

verificar que o cenário mais desfavorável ocorre agora para uma das combinações de acções que contempla tanto acções permanentes como de vento, ou seja, o incremento de uma nova acção corresponde a um cenário onde o índice de fiabilidade diminui. O facto das combinações *PV1* e *PV2* apresentarem valores de fiabilidade diferentes, advém principalmente da assimetria de degradação encontrada nas asnas.

3.7 Curvas de evolução temporal de degradação

Definida a geometria da asnas de madeira no início e final da sua vida útil estrutural, foi realizado um estudo da evolução da degradação e consequente influência nos índices de fiabilidade em função do tempo. Esta análise considerou um modelo idealizado de degradação definido por dois parâmetros [7] [8]: um período inicial de propagação do fenómeno de degradação, t_{lag} (ano) e um rácio de penetração anual, r (mm/ano). Neste trabalho os parâmetros do modelo foram obtidos iterativamente calibrando os valores pretendidos tendo em consideração os índices de fiabilidade calculados anteriormente. Dessa forma, para diferentes modelos geométricos foram obtidos valores diferentes de r . Após obtidos os parâmetros do modelo, foi possível representar curvas de evolução temporal de degradação para a asna mais degradada, conforme apresentado na Fig. 3 para o exemplo do modelo de secção transversal determinística e valores observados.

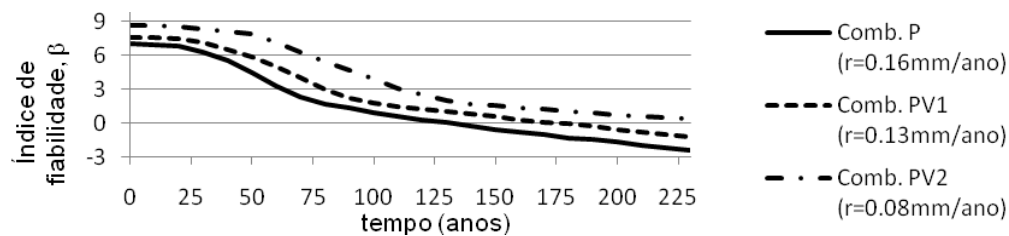


Figura 3. Curva de evolução temporal de degradação para a asna 2, modelo de secção transversal determinística e valores observados.

As curvas de evolução temporal do índice de fiabilidade apresentaram, para todos os casos estudados, três fases distintas. A primeira fase, condicionada pelo factor t_{lag} , apresenta valores constantes de índice de fiabilidade. Após término do período de incubação do fenómeno de degradação, ou seja quando o fenómeno de degradação está completamente activo, é verificado um decréscimo significativo dos índices de fiabilidade, consequência da redução de secção transversal residual. A terceira fase apresenta também um decréscimo dos índices de fiabilidade, apesar de mais ligeiro pois neste período as probabilidades de rotura são já bastante elevadas. A *Combinação P* continua a apresentar a situação mais desfavorável em todos os modelos e instantes de tempo, porque foi utilizado um factor k_{mod} menor nessa combinação.

As curvas de evolução temporal de degradação para o modelo de secções transversais determinísticas apresentam derivadas semelhantes. A principal diferença entre elas reside

numa translação vertical das curvas. Para os outros dois modelos a *Combinação PV2* tem um comportamento ligeiramente diferente comparada com as restantes combinações.

4. CONCLUSÕES

Diferentes modelos geométricos foram considerados para obtenção de parâmetros de fiabilidade, atendendo a resultados de testes não destrutivos e ao nível de degradação de asnas em madeira. No estudo da asna mais degradada, foi encontrado que um factor de capacidade restante de sensivelmente 25% afecto à área de secção transversal degradada seria adequado. Para o mesmo caso, um modelo de secções transversais probabilísticas foi implementado com resultados semelhantes.

Quando efectuada uma análise à influência do factor k_{mod} foi encontrado que a consideração de diferentes factores k_{mod} , para cada um dos tipos de acções de durações diferentes, apresentava resultados de parâmetros de fiabilidade mais adequados para a análise de segurança de estruturas existentes degradadas.

Referente ao estudo de um modelo idealizado de degradação, foram apresentadas hipóteses para a evolução temporal de degradação, onde foi indicada a diminuição dos índices de fiabilidade em cada fase de vida útil da asna mais degradada.

Apesar dos diferentes modelos geométricos assumidos e análises produzidas, este trabalho poderá ser melhorado através da consideração de degradações ou defeitos locais, tais como nós e fissuras na madeira, nos modelos probabilísticos.

AGRADECIMENTOS

O apoio financeiro dado pela Fundação de Ciência e Tecnologia (FCT), através do projecto PTDC/66527-2006, é gratificadamente reconhecido. O terceiro autor agradece o apoio conferido pela FCT através do centro de investigação UNIC.

REFERÊNCIAS

- [1] CEN – ENV 1995-1-1 - Eurocode 5 - Design of Timber Structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, 2004, European Committee for Standardization, 123 p.
- [2] Joint Committee on Structural Safety – JCSS Probabilistic Model Code, Part 3: Resistance Models – 3.5 Properties of Timber, 2006, www.jcss.ethz.ch, 16 p.
- [3] Lourenço, P.; Valle, A. e Brites, R. – “Levantamento do estado de degradação das Asnas da Cobertura do Laboratório Chimico - A1, Coimbra”, DECUM, 2005, Guimarães, Portugal, 12 p.
- [4] Joint Committee on Structural Safety – JCSS Probabilistic Model Code, Part 2: Load Models, 2001, www.jcss.ethz.ch, 73 p.

- [5] Ranta-Maunus, A. – “Theoretical and Practical Aspects of the Reliability Analysis of Timber Structures” em WCTE2004 Conference, Finlândia, 2004, 5 p.
- [6] CEN – *ENV 1991-1-4 - Eurocode 1 – Actions on structures - Part 1-4: General actions – Wind actions*, 2005, European Committee for Standardization, 146 p.
- [7] Leicester, R.H. – “Engineered durability for timber construction”, *John Wiley & Sons, Ltd.*, 2001, CSIRO, Highett, Austrália, p. 216-227.
- [8] Wang, C.; Leicester, R. e Nguyen, M. – “Probabilistic procedure for design of untreated timber poles in-ground under attack of decay fungi”, CSIRO, 2006, www.sciencedirect.com, 6 p.