

TÓPICO 3 – Procedimentos

Avaliação da Segurança de Cobertura Tradicional de Madeira Sujeita a Degradação Biológica

Ricardo D. Brites^{1,a}, Luís C. Neves^{2,b}, José Saporiti Machado^{3,c} e Paulo B. Lourenço^{1,d}

¹Dep.º Eng.ª Civil, Universidade do Minho, Azurém 4800-058 Guimarães, PORTUGAL

² Dep.º Eng.ª Civil, FCT - Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, PORTUGAL

³Núcleo de Estruturas de Madeira, LNEC, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, PORTUGAL

^arbrites@civil.uminho.pt, ^b luis.neves@fct.unl.pt, ^csaporiti@lnec.pt, ^dpbl@civil.uminho.pt

Palavras-chave: fiabilidade estrutural, estruturas de madeira, degradação biológica

Resumo

O presente trabalho propõe-se apresentar a modelação probabilística de uma estrutura-tipo de uma cobertura tradicional de madeira, sendo tomadas como variáveis aleatórias as dimensões geométricas das secções transversais, as propriedades mecânicas da madeira e as acções aplicadas à estrutura, dando especial ênfase ao vento e neve. Depois de estabelecido o índice de fiabilidade β para uma situação de não degradação, será avaliada a sua variação em função da evolução da degradação biológica provocada por fungos, modelada probabilisticamente como uma variação de secção transversal.

Introdução

A verificação de segurança de estruturas existentes requer um conhecimento das propriedades geométricas e mecânicas do material utilizado, bem como das cargas aplicadas à estrutura. Enquanto a geometria pode ser determinada com relativa facilidade, as duas restantes mostram-se de difícil obtenção.

Em estruturas de madeira, devido às propriedades mecânicas serem dependentes de parâmetros como a duração das acções e teor em água da madeira, o problema agudiza-se. Acresce ainda a degradação biológica habitualmente verificada em zonas de apoios em paredes de alvenaria, que propiciam a deterioração da capacidade resistente da madeira com o tempo.

Por outro lado, a verificação da segurança estrutural baseada na regulamentação em vigor para novos edifícios (Eurocódigos) mostra-se bastante penalizador para estruturas existentes, devido a esta ser estabelecida considerando pressupostos que podem não ser verdadeiros em estruturas existentes. Um mais profundo conhecimento dos parâmetros que influem na capacidade resistente e sua variabilidade permite obter resultados mais próximos da realidade, onde sejam discriminadas explicitamente as variações estatísticas de cada um dos parâmetros que influem na segurança estrutural [1].

O desenvolvimento verificado nas últimas décadas no poder de processamento computacional aliado ao melhoramento dos métodos de fiabilidade estrutural permite que o seu uso em casos práticos seja uma realidade. Em paralelo, o desenvolvimento de modelos de código com índole probabilística, nomeadamente o *Probabilistic Model Code* (PMC) [2], tem permitido a difusão da filosofia de análise probabilística de estruturas, bem como a disponibilização das metodologias mais actuais de modelação das diferentes grandezas probabilísticas intervenientes no processo. Embora o PMC [2] não se encontre concluído, o estágio avançado de desenvolvimento em que se encontra já o torna viável para a aplicação experimental em casos práticos.

A natureza probabilística dos métodos de fiabilidade estrutural torna-os apetecíveis para a verificação da segurança de estruturas existentes, devido a poderem incorporar uma maior quantidade de informação estrutural (variabilidade das grandezas), o que implicará necessariamente uma avaliação mais adequada.

Para estruturas de madeira, poder-se-ia julgar que a variabilidade natural da madeira o tornaria num candidato ideal a este tipo de análise, mas paradoxalmente, a utilização de métodos de fiabilidade estrutural em verificações da segurança de estruturas de madeira é quase inexistente, o que pode em parte ser explicado pela relativa novidade dos modelos existentes e por questões de pormenor das estruturas de madeira (efeito dos nós, duração da carga, etc.) que apenas recentemente foram tratadas na bibliografia da especialidade e pela dificuldade em atribuir valores característicos de resistência aos elementos.

Modelação probabilística simplificada: o método de Monte Carlo

Ao contrário da metodologia *semi-probabilística*, a base da formulação de segurança sugerida pelos actuais regulamentos estruturais, os métodos probabilísticos permitem entrar em linha de conta de forma explícita com as variabilidades naturais das grandezas em estudo, o que permite resultados mais realistas, embora necessitando de mais informação estrutural e mais poder computacional.

O método de simulação de Monte Carlo, utilizado no âmbito deste trabalho, insere-se nos métodos probabilísticos simplificados e consiste na avaliação da função de Estado Limite num número finito de pontos escolhidos aleatoriamente. Tal é conseguido através da simulação de um elevado número eventos e avaliação da resposta estrutural para cada um dos vectores de variáveis aleatórias (eventos), sendo depois esta resposta estudada estatisticamente. Naturalmente, quanto maior o número de simulações, mais próximo do valor teórico se encontrará o valor obtido através da simulação. Dentro do método de simulação de Monte Carlo, existem diversas técnicas, sendo neste trabalho apenas estudado o método de simulação pura, que se pode sistematizar no seguinte procedimento:

1. Definição do problema em termos de variáveis aleatórias;
2. Quantificação das características das variáveis aleatórias (função densidade de probabilidade e correlações entre variáveis);
3. Simulação de N_{sim} vectores de variáveis aleatórias;
4. Avaliação estrutural determinística de cada um dos N_{sim} vectores de variáveis aleatórias;
5. Designando por N_f o número de simulações onde a função de estado limite não é satisfeita, a probabilidade de rotura da estrutura p_f pode ser estimada de acordo com a Eq. 1:

$$p_f = \frac{N_f}{N_{sim}} \quad (1)$$

6. Determinação da precisão e eficiência da simulação, através da variação do número de simulações N_{sim} e quais as suas consequência nos resultados obtidos.

Para aplicação do método de Monte Carlo é necessário conhecer as distribuições probabilísticas das diversas variáveis aleatórias do problema, as correlações entre si e quais as funções de estado limite a verificar. Nos pontos seguintes serão apresentados os modelos probabilísticos das diversas variáveis aleatórias intervenientes na análise estrutural.

Uma previsão do erro máximo cometido na previsão da probabilidade de rotura com um nível de confiança de 95% é dada pela Eq. 2, proposta por Shooman [3] citada em , em função do número de simulações e da probabilidade de rotura:

$$erro(\%) = 200 \sqrt{\frac{1 - p_f}{N_{sim} \cdot p_f}} \quad (2)$$

Modelos probabilísticos para as propriedades mecânicas da madeira

Os modelos utilizados para a modelação probabilística das propriedades mecânicas da madeira encontram-se descritos em PMC [2,4]. O método proposto consiste na estimação de todas as propriedades mecânicas através do conhecimento das denominadas *variáveis de referência*, nomeadamente a tensão de rotura à flexão (f_m), módulo de elasticidade em flexão (E_m) e densidade média (ρ_m); as variáveis aleatórias das restantes propriedades mecânicas são depois estabelecidas através de expressões empíricas, sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1: Funções densidade de probabilidade das diversas propriedades mecânicas da madeira, definidas em função das propriedades de referência (linhas a sombreado), de acordo com [2].

Propriedade, X	Distribuição	Valor Esperado, $E[X]$	Coef. de variação, $CV[X]$
Tensão de rotura à flexão, f_m	Lognormal	$E [f_m]$	0.25
Módulo de elasticidade à flexão, E_m	Lognormal	$E [E_m]$	0.13
Densidade Média, ρ_m	Normal	$E [\rho_m]$	0.10
Tensão de rotura à tracção paralela ao fio, $f_{t,0}$	Lognormal	$0.6 E [f_m]$	$1.2 CV[f_m]$
Tensão de rotura à tracção perpendicular ao fio, $f_{t,90}$	Weibull	$0.015 E [\rho_m]$	$2.5 CV[\rho_m]$
Módulo de elasticidade à tracção paralela ao fio, $E_{t,0}$	Lognormal	$E [E_m]$	$CV[E_m]$
Módulo de elasticidade à tracção perpendicular ao fio, $E_{t,90}$	Lognormal	$E [E_m]/30$	$CV[E_m]$
Tensão de rotura à compressão paralela ao fio, $f_{c,0}$	Lognormal	$5 E [f_m]^{0.45}$	$0.8 CV[f_m]$
Tensão de rotura à compressão perpendicular ao fio, $f_{c,90}$	Normal	$0.008 E [\rho_m]$	$CV[\rho_m]$
Módulo de distorção, G_v	Lognormal	$E [E_m]/16$	$CV[E_m]$
Tensão de rotura ao corte, f_v	Lognormal	$0.2 E [f_m]^{0.8}$	$CV[f_m]$

Estas grandezas também estão correlacionadas entre si, ou seja, os resultados de umas influem nas restantes, sendo que os coeficientes de correlação são atribuídos empiricamente, de tal modo que $0.8 \leftrightarrow$ elevada correlação, $0.6 \leftrightarrow$ média correlação, $0.4 \leftrightarrow$ baixa correlação e $0.2 \leftrightarrow$ muito baixa correlação. Na Tabela 2 encontram-se os valores sugeridos no PMC [2], que seguem os princípios já enumerados.

Tabela 2: Matriz de correlação entre as variáveis aleatórias do material sugeridas pelo PMC [2].

	f_m	E_m	ρ_m	$f_{t,0}$	$f_{t,90}$	$E_{t,0}$	$E_{t,90}$	$f_{c,0}$	$f_{c,90}$	G_v	f_v
f_m	1.0	0.8	0.6	0.8	0.4	0.6	0.6	0.8	0.6	0.4	0.4
E_m	0.8	1.0	0.6	0.6	0.4	0.8	0.4	0.6	0.4	0.6	0.4
ρ_m	0.6	0.6	1.0	0.4	0.4	0.6	0.6	0.8	0.8	0.6	0.6
$f_{t,0}$	0.8	0.6	0.4	1.0	0.2	0.8	0.2	0.5	0.4	0.4	0.6
$f_{t,90}$	0.4	0.4	0.4	0.2	1.0	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4	0.6
$E_{t,0}$	0.6	0.8	0.6	0.8	0.4	1.0	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4
$E_{t,90}$	0.6	0.4	0.6	0.2	0.4	0.4	1.0	0.6	0.2	0.6	0.6
$f_{c,0}$	0.8	0.6	0.8	0.5	0.2	0.4	0.6	1.0	0.6	0.4	0.4
$f_{c,90}$	0.6	0.4	0.8	0.4	0.4	0.4	0.2	0.6	1.0	0.4	0.4
G_v	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4	1.0	0.6
f_v	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.4	0.6	0.4	0.4	0.6	1.0

Modelos probabilísticos para as cargas aplicadas à estrutura

As acções a que qualquer estrutura está sujeita podem ser distinguidas entre as permanentes, a que a estrutura está sujeita durante toda a sua vida útil e as variáveis, que apenas actua na estrutura durante um determinado período e com uma determinada periodicidade.

As cargas permanentes estão normalmente associadas a pesos próprios da estrutura e dos seus elementos constituintes, pelo que podem ser contabilizados estatisticamente considerando as variáveis estatísticas das dimensões dos elementos e peso volúmico do respectivo material.

Nas cargas variáveis, devido à sua natureza estocástica, o problema é mais complexo, pois é necessário recorrer a distribuições de extremos para contabilizar os valores máximos que essa variável assume durante a vida útil da estrutura, sendo que a periodicidade, a distribuição seguida e os respectivos parâmetros dependem do tipo de acção.

No caso de estruturas de madeira, assumem particular importância a sobrecarga de utilização nos pavimentos e a neve e o vento nas coberturas, por serem as acções condicionantes para efeitos de dimensionamento e verificação da segurança estrutural.

Os modelos para as diferentes acções são descritos em pormenor na bibliografia da especialidade [2], devendo-se no entanto referir que se trata de um campo demasiado vasto e complexo, que naturalmente sai do âmbito do presente trabalho.

Funções de estado limite e valores do coeficiente de fiabilidade da estrutura

As funções de estado limite a verificar e os valores admissíveis para o coeficiente de fiabilidade β devem ser estabelecidas para cada estado limite em estudo.

A definição das funções de estado limite $G(x)$ deve ser tal que a esta assumam valores negativos quando o estado limite não é satisfeito, o que pode ser conseguido com equações como:

$$G(x) = 1 - \frac{S(x)}{R(x)} \text{ ou } G(x) = R(x) - S(x) \quad (3)$$

onde $R(x)$ a representar as propriedades resistentes e $S(x)$ o efeito das acções aplicadas.

Na verificação aos estados limites últimos (ELU) de estruturas de madeira, é habitual a verificação ser realizada para casos complexos de combinações de esforços (e.g. compressão e flexão), pelo que é necessária uma formulação mais abrangente, embora compatível com o formato da Eq. 3. Köhler *et al.* [4] sugeriram o uso de uma formulação baseada nas verificações aos ELU preconizados no Eurocódigo 5 [5], adaptado para a formulação da Eq. 3. Este tipo de equação leva a funções do estado limite como a apresentada na Eq. 4, referida a título de exemplo, numa situação de flexão composta com compressão, adoptando para coeficientes parciais de segurança o valor unitário.

$$G(x) = 1 - \left[\frac{\sigma_{c,0}}{k_{c,y} f_{c,0}} + \frac{\sigma_{m,y}}{f_{m,y}} + k_m \frac{\sigma_{m,z}}{f_{m,z}} \right] \quad (4)$$

No que respeita a valores aceitáveis para o coeficiente de fiabilidade e probabilidade de rotura admissíveis, PMC [2] sugere os valores apresentados na Tabela 3. As consequências do colapso prendem-se com a natureza do edifício e das consequências em termos de vidas humanas ou de operacionalidade em situação de emergência, enquanto que o custo relativo do melhoramento da segurança é um parâmetro relativo à dificuldade sentida para melhorar o desempenho estrutural.

Tabela 3: Valores normalmente aceitáveis para o coeficiente de fiabilidade β , sugeridos por PMC [2] para estados limites últimos, em função do custo de melhoramento da segurança estrutural e das consequências do colapso. O valor habitualmente preconizado é o da célula sombreada.

Custo relativo de melhoramento da segurança	Consequências do colapso		
	Reduzidas (edifícios agrícolas, silos, etc.)	Médias (escritórios, habitações, edifícios industriais)	Elevadas (pontes, teatros, hospitais, etc.)
Elevado	$\beta=3.1 (p_f \approx 10^{-3})$	$\beta=3.3 (p_f \approx 5 \times 10^{-4})$	$\beta=3.7 (p_f \approx 10^{-4})$
Normal	$\beta=3.7 (p_f \approx 10^{-4})$	$\beta=4.2 (p_f \approx 10^{-5})$	$\beta=4.4 (p_f \approx 5 \times 10^{-6})$
Baixo	$\beta=4.2 (p_f \approx 10^{-5})$	$\beta=4.4 (p_f \approx 5 \times 10^{-6})$	$\beta=4.7 (p_f \approx 10^{-6})$

Modelos probabilísticos para ataques por fungos em estruturas de madeira

Uma das principais anomalias em estruturas de madeira é a podridão da madeira, devida à acção de fungos de podridão em zonas de humidade elevada, ventilação reduzida e temperatura amena. São casos típicos os apoios de vigas de pavimentos e linhas de asnas em paredes de alvenaria, que propiciam situações de elevado teor em água.

A degradação biológica da madeira provocada por fungos depende da temperatura e teor em água da madeira e desenvolve-se frequentemente desde a periferia da peça para o interior. É comum considerar-se que a taxa de penetração da frente de degradação na peça é constante, após um período inicial de incubação do fungo na peça, conforme se indica na Figura 1 a). Este rácio de penetração por unidade de tempo, r , deve ser calibrado para cada espécie de madeira, fungo e condições climáticas (temperatura e teor em água). Para o mesmo tipo de fungo e condições de temperatura e teor em água, madeiras com maior durabilidade natural, terão taxas de penetração menores que as de menor durabilidade, conforme se ilustra na Figura 1 b).

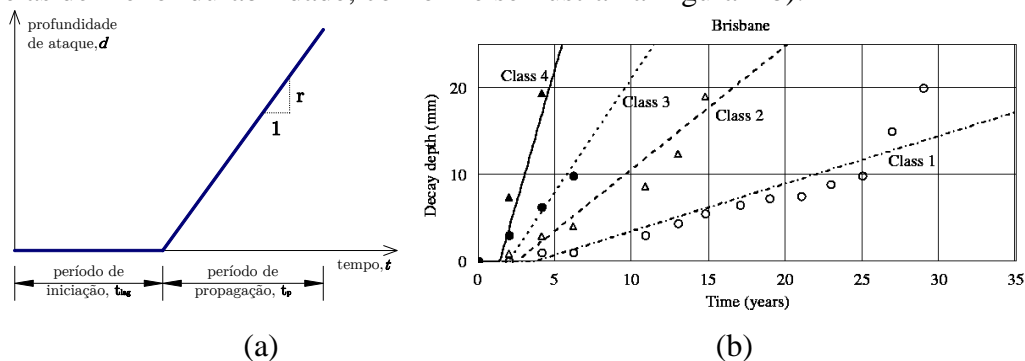


Figura 1: Modelação da degradação biológica em peças de madeira: (a) Diagrama teórico da evolução da degradação ao longo do tempo (adaptado de Wang *et al.* [6]); (b) resultados experimentais obtidos por Wang *et al.* [6] para espécimes enterrados no solo, em função da classe de durabilidade

Para efeitos de modelação probabilística, Wang *et al.* [6] sugerem que o parâmetro t_{lag} (ver Figura 1) seja considerado como determinístico e r siga uma distribuição Lognormal com valores de referência para o coeficiente de variação entre 0.50 e 1.00, conforme a classe de durabilidade natural das madeiras seja menor ou maior, respectivamente.

Para a calibração em espécies de madeira com aplicações estruturais a nível nacional, encontra-se em curso nas instalações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) uma campanha de ensaios com madeira de Pinho bravo, apresentando diferentes secções transversais e sujeitos a diferentes tempos de exposição ao fungo. Nesta campanha, após a exposição por um período predeterminado ao fungo, proceder-se-ão a ensaios não destrutivos e destrutivos, a fim de determinar e correlacionar os valores obtidos nos vários ensaios. Os valores obtidos serão depois confrontados com a profundidade de degradação, obtida a partir de perfis de Espectroscopia de

Infravermelho próximo (FT-NIR) realizados no Instituto de Investigação Científica Tropical, que permitirá a delimitação “exacta” da zona degradada para cada espécime, definindo assim a profundidade de ataque. Na Figura 2 apresentam-se alguns dos provetes da campanha de ensaios, que de momento se encontram em degradação.

Dada a morosidade inerente aos ensaios de degradação, de momento ainda não se encontram disponíveis resultados experimentais relevantes, pelo que serão utilizados dados obtidos da bibliografia no âmbito do presente trabalho.



(a)

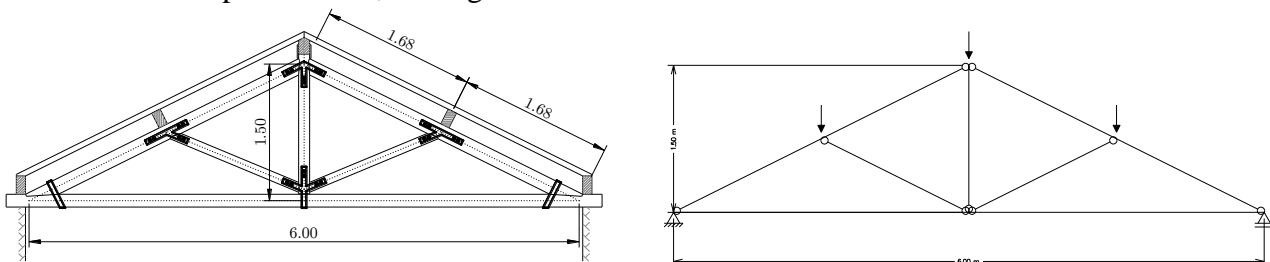


(b)

Figura 2: Ensaio de degradação em curso no LNEC: (a) provetes de tracção, submetidos a degradação na zona central; (b) provetes de compressão, inseridos num meio de cultura

Análise probabilística de estrutura-tipo para situação de não degradação

De modo a clarificar os conceitos introduzidos anteriormente, procedeu-se à análise probabilística de segurança de uma estrutura-tipo de madeira, nomeadamente uma asna simples de madeira com 6.00m de vão em pinho bravo, ver Figura 3.



(a)

(b)

Figura 3: Asna-tipo analisada: (a) asna real; (b) modelo de barras adoptado

As variáveis aleatórias consideradas no problema estão sintetizadas na Tabela 4, sendo que as restantes propriedades mecânicas são obtidas pelas relações já apresentadas na Tabela 1, considerando as correlações definidas na Tabela 2. No que respeita às acções, adoptaram-se os valores médios e coeficientes de variação compatíveis com as disposições regulamentares [7] e com a bibliografia da especialidade [8], também apresentadas na tabela seguinte. Em relação à duração da carga, usou-se um coeficiente de modificação para um carregamento de longa duração, em acordo com o preconizado no Eurocódigo 5 [5], ou seja, $k_{mod}=0.60$.

Tabela 4: Funções densidade de probabilidade e respectivos parâmetros considerados no problema analisado. As propriedades mecânicas não referidas nesta tabela serão obtidas com base nas relações empíricas apresentadas na Tabela 1.

Propriedade, X	Distribuição	E[X]	CV[X]
Tensão de rotura à flexão, f_m [MPa]	Lognormal	18.0	0.25
Módulo de elasticidade à flexão, f_m [GPa]	Lognormal	12.0	0.13
Densidade Média, ρ_m [kg/m ³]	Determinística	580	-
Coefficiente de Poisson, ν [-]	Determinística	0.30	-
Secção transversal da linha, $b \times h$ [m]	Normal	0.12×0.18	0.10×0.10
Secção transversal das pernas, $b \times h$ [m]	Normal	0.12×0.20	0.10×0.10
Secção transversal do pendural e escoras, $b \times h$ [m]	Normal	0.12×0.12	0.10×0.10
Acções Permanentes, G [kN/m]	Normal	3.50	0.20
Sobrecarga de Neve, S [kN/m]	Gumbel	0.73	0.40

A implementação do método de simulação de Monte Carlo foi realizada em MATLAB[®], considerando um comportamento elástico linear para os materiais e fazendo uso das funções de geração de variáveis aleatórias já implementadas no software. O fluxograma de funcionamento do programa desenvolvido encontra-se esquematizado na Figura 4.

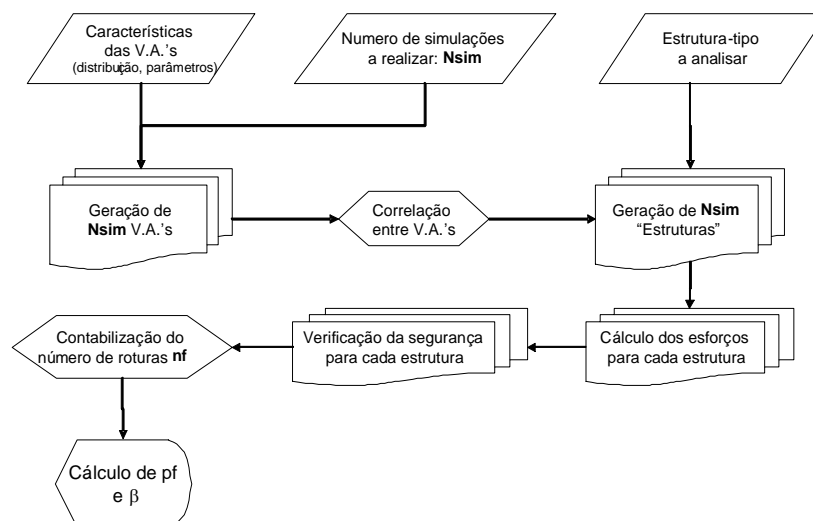


Figura 4: Fluxograma de funcionamento das rotinas implementadas em MATLAB[®]

A análise de fiabilidade estrutural da asna em estudo começou pela calibração do número de simulações a realizar, o que foi conseguido através da determinação da probabilidade de rotura p_f para valores crescentes de simulações, de modo a verificar qual a quantidade de simulações necessárias para resultados aceitáveis, i.e. a partir de que quantidade de simulações o valor de p_f estabiliza. Nesta análise, apresentada na Figura 5, foi possível verificar que a partir das 300000 simulações assiste-se a uma estabilização dos resultados.

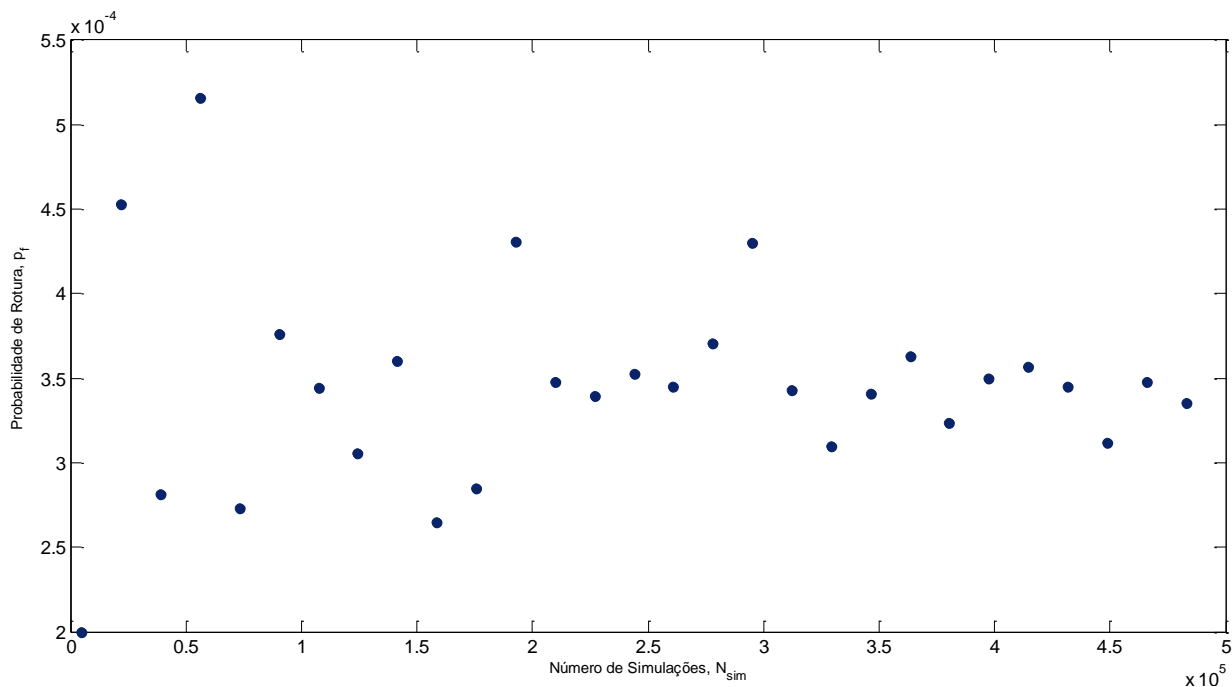


Figura 5: Variação da probabilidade de rotura simulada p_f com o número de simulações realizadas N_{sim} , para a asna em estudo

Uma nova simulação com os referidos parâmetros e 5×10^5 simulações permitiu estabelecer a função densidade de probabilidade para a estrutura, bem como para cada um dos seus membros constituintes. Pela análise dos resultados, pode-se observar que os elementos críticos na verificação de segurança estrutural são as pernas da asna, nomeadamente os troços inferiores (locais onde se verifica, em média, maiores esforços axiais de compressão e momentos flectores), conforme se pode verificar pelos resultados sintetizados na Figura 6. A probabilidade de rotura encontrada foi de $p_f = 3.30 \times 10^{-4}$ (erro máximo: 15.3%), a que corresponde um índice de fiabilidade de $\beta = 3.41$.

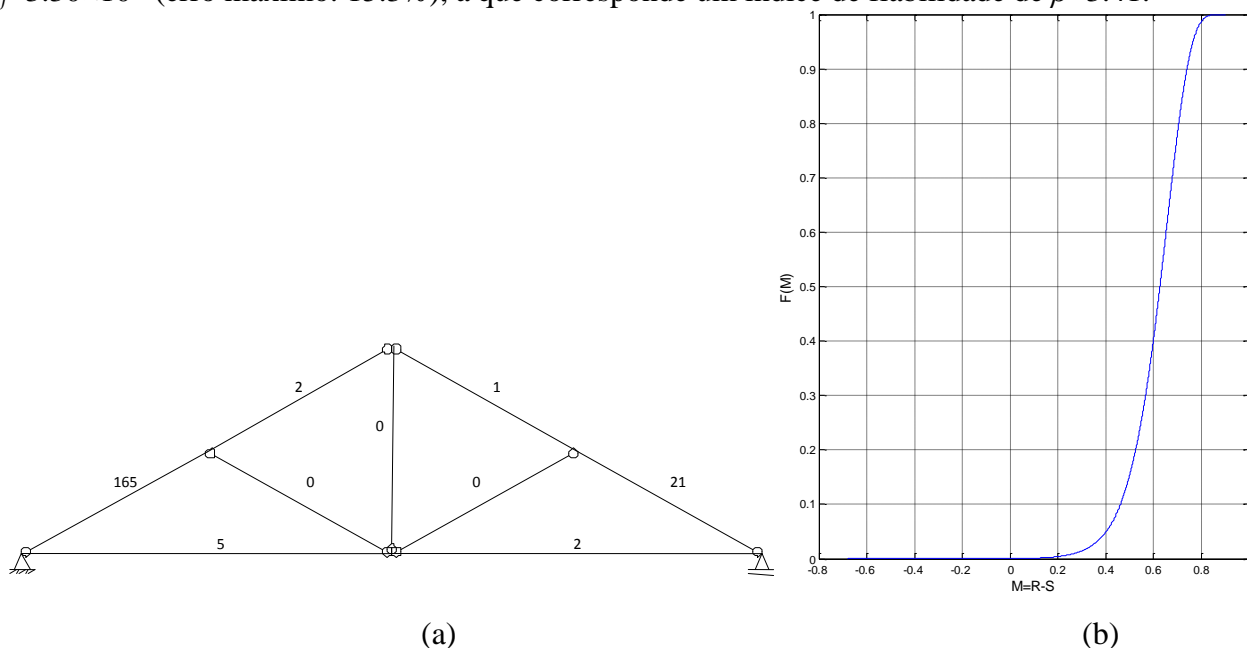


Figura 6: Resultados obtidos na análise de Monte Carlo para a asna-tipo, 5×10^5 simulações: (a) número de roturas verificadas em cada elemento constituinte da estrutura; (b) função de distribuição acumulada da variável margem de segurança, M (estabelecida com base em equações como a Eq. 4).

Evolução da probabilidade de rotura com a degradação biológica

Após a determinação da probabilidade de rotura e respectivo índice de fiabilidade da estrutura-tipo para uma situação de não degradação, propõem-se agora analisar a sua variação com o aumento da degradação na estrutura.

Nesta análise, partindo-se do modelo anterior, adicionou-se degradação aos troços inferiores das pernas como uma variação da sua secção transversal a uma taxa de penetração por face e por ano dada por uma variável aleatória com as características apresentadas na Tabela 5. A taxa de penetração anual foi considerada de acordo com os dados da bibliografia [6].

Tabela 5: Propriedades das variáveis aleatórias relativas à degradação biológica. As restantes propriedades são as já apresentadas na Tabela 4.

Propriedade, X	Distribuição	E[X]	CV[X]
Taxa de penetração anual, r [mm/ano]	Lognormal	1.00	1.00
Tempo de incubação, t_{lag} [ano]	Determinística	3.00	-

As simulações realizadas para um período de 50 anos (5.0×10^4 eventos) mostram uma variação exponencial da probabilidade de rotura com o acréscimo de degradação, passando-se de valores da ordem dos $p_{f,0} = 3.30 \times 10^{-4}$ no início (ano 0) para valores cerca de 2500 vezes superiores no ano cinquenta ($p_{f,50} = 0.82$), caso se permita uma propagação contínua do fungo, ver Figura 7. Note-se este estudo da evolução do índice de fiabilidade com a degradação não entrou em conta explicitamente com outros parâmetros que a análise de uma estrutura real não poderia dispensar, nomeadamente o efeito da duração das acções, que iria aumentar a segurança num período inicial e penalizá-la para um período mais avançado.

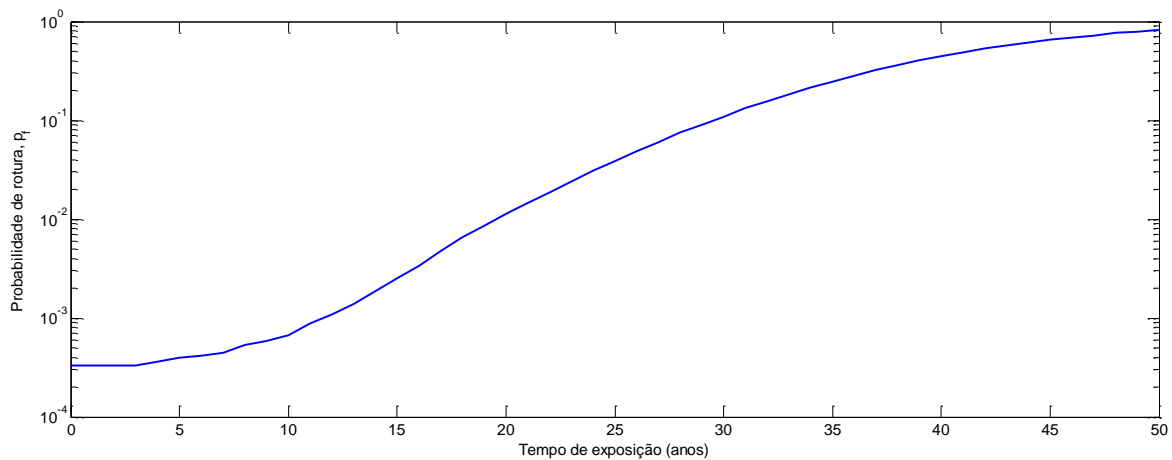


Figura 7: Análise da evolução da probabilidade de rotura com os anos de exposição a um ataque biológico por fungos com as características apresentadas na Tabela 5.

Considerando os valores preconizados na Tabela 3 para a probabilidade de rotura, cerca de 11 anos após o início da exposição, a estrutura teria de ser submetida a intervenções que melhorassem o seu desempenho estrutural, pois a partir desse ponto a probabilidade de rotura ultrapassa os valores desejáveis (considerando como valor limite $p_f = 10^{-3}$).

Conclusões e futuros possíveis melhoramentos ao modelo proposto

No presente trabalho foi apresentada a metodologia de modelação probabilística simplificada de estruturas de madeira, considerando como variáveis aleatórias as secções transversais, as propriedades mecânicas e as cargas aplicadas.

Os conceitos foram depois aplicados para uma estrutura-tipo de uma cobertura tradicional de madeira, onde foi obtido o índice de fiabilidade da estrutura. Numa segunda fase aplicou-se uma

deterioração provocada por fungos à estrutura, considerando-se também esse parâmetro como aleatório. O resultado obtido foi um aumento exponencial da probabilidade de rotura com o incremento do ataque, o que se enquadra no comportamento previsto para este tipo de ataque.

A verificação da segurança da presente estrutura-tipo pode servir como um exemplo de verificação de segurança facilmente extrapolável a outras estruturas similares. Contudo, para um adequado conhecimento da real condição de segurança estrutural através de métodos de fiabilidade estrutural, seria fundamental dotar o presente método de variáveis que entrassem em linha de conta com o efeito da duração das acções, bem como a hipótese de contabilização da introdução de reforços estruturais no melhoramento da segurança estrutural, o que permitiria uma contabilização da eficácia de cada método de reforço e quando tal acção deveria ser realizada, de modo a manter o nível de segurança estrutural (ou o índice de fiabilidade) acima de um valor limite. No que respeita a estados limites de utilização, uma formulação probabilística para averiguação deste tipo de estados limite seria de inegável interesse, mas as questões de determinação da deformação *real* das estruturas de madeira (incluindo das deformações das ligações entre elementos, com um comportamento semi-rígido) torna complexa a sua implementação em modelos probabilísticos.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, através da bolsa de doutoramento do primeiro autor (referência SFRH/BD/27353/2006) e do projecto Avaliação da segurança de estruturas de madeira por meio de métodos não destrutivos e análise estocástica (Projecto FCT PTDC/ECM/66527/2006). Também se reconhece a colaboração do Instituto de Investigação Científica Tropical pela disponibilização e utilização do equipamento de FT-NIR, essencial para os ensaios de degradação em curso no LNEC.

Referências

- [1] L. Neves e P. Cruz: *Introdução à Análise probabilística Simplificada da Segurança Estrutural*, Engenharia Civil –UM Vol.12 (2001), pp. 65-80.
- [2] Joint Committee of Structural Safety: *Probabilistic Model Code*, internet publication: www.jcss.ethz.ch (2001)
- [3] R. Laranja e J. de Brito: *Verificação Probabilística da Segurança das Estruturas*, Engenharia Civil –UM Vol.18 (2003), pp. 63-79.
- [4] J. Köhler, J. Sørensen e M. Faber: *Probabilistic modeling of timber structures*, Structural Safety Vol. 29 (2007), pp. 255-267.
- [5] CEN: *EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*, Final Version (2004)
- [6] Chi-Hsiang Wang, Robert H. Leicester e Minh Nguyen: *Probabilistic procedure for design of untreated timber poles in-ground under attack of decay fungi*, Reliability Engineering and System Safety 93 (2008), pp. 476–481
- [7] CEN: *EN 1991-1-3 Eurocode 1: Actions on Structures – Part1-3: General Actions – Snow loads*, Final Version (2003)
- [8] Alpo Ranta-Maunus: *Theoretical and Practical Aspects of the Reliability Analysis of Timber Structures*, WCTE (2004), Lathi, Filândia