

Modelação do comportamento mecânico da madeira de secção circular.

Telmo F.M. Morgado

MSc, Investigador Assistente, Dep. Eng. Civil
Universidade de Coimbra, Coimbra
telmo.morgado@gmail.com



Alfredo M. P. Dias

PhD, Professor Auxiliar, Dep.Eng. Civil,
Universidade de Coimbra, Coimbra
alfgdias@dec.uc.pt



José Saporiti Machado

PhD, Investigador Auxiliar, Dep. de Estruturas
LNEC, Lisboa
saporiti@lnec.pt



João H. Negrão

PhD, Professor Associado, Dep.Eng. Civil,
Universidade de Coimbra, Coimbra
jhnegrao@dec.uc.pt



Palavras-chave – Modelação, secção circular, propriedades mecânicas, geração de números aleatórios

Keywords – Simulation, round section, mechanical properties, random generation numbers

RESUMO

O SIMPOLE (SIMulator of POLEs) é um programa de computador, construído em VBA (Visual Basic for Applications) do Microsoft Excel®, constituído por 2 módulos. O primeiro módulo é responsável pela geração da geometria do toro e distribuição de nós ao longo do seu comprimento. É possível, igualmente, a inserção destas características por parte do utilizador. O segundo módulo permite o ensaio do toro, gerado ou inserido, segundo o preconizado na norma EN14229. O SIMPOLE tem como *output* final a resistência à flexão e o módulo de elasticidade do toro, bem como a localização e causa de rotura. Este programa terá como principal aplicação a determinação das características mecânicas de toros procedentes de uma floresta, conhecendo as distribuições estatísticas dos defeitos e das características mecânicas da madeira limpa. Este programa, não finalizado, carece de validação, apresentando-se neste artigo os princípios e procedimentos do software desenvolvido.

ABSTRACT

SIMPOLE (SIMulator of POLEs) is a computer program, built in VBA (Visual Basic for Applications) of Microsoft Excel Excel®, that is composed by two modules. The first module comprises the geometry generation of the pole and the distribution of knots along its length. It is also possible the definition of these characteristics by the user. In the second module, the poles are tested according to standard EN14229. SIMPOLE outputs are the bending strength and modulus of elasticity of the pole, as well as the location and cause of failure. The mains use of SIMPOLE will be the determination of mechanical properties of logs from a forest stand, knowing the statistical distribution of defects and clear wood mechanical properties. This program, not yet finalized, needs validation, being presented in this paper the principles and procedures of the software.

1. Introdução

Ferramentas que permitam obter o módulo de elasticidade e a resistência à flexão de elementos de madeira de secção circular são importantes na medida em que permitem prever o impacto de alterações a nível dos povoamentos, alterações na gestão florestal e avaliar a repercussão a nível dos valores característicos da introdução de árvores provenientes de outras áreas geográficas. Na base destas ferramentas estão modelos que permitem simular quer a distribuição de defeitos nas peças quer a variação da sua resistência.

Riberholt e Madsen (1979) propuseram um modelo para ter em conta a variação da resistência ao longo da viga de madeira. Consideraram que a resistência é constante ao longo do eixo da viga, excepto quando ocorrem defeitos, como por exemplo nós ou fio inclinado. A resistência entre nós aproxima-se dos valores observados em madeira limpa, as quais são assumidas uniformes ao longo do comprimento. Na zona dos defeitos a resistência depende do tamanho dos nós e da inclinação das fibras. Czmoch *et al.* (1991) usaram um modelo semelhante ao anterior para determinação da variabilidade da resistência à flexão ao longo do comprimento de elementos de madeira estrutural. A distribuição da resistência é modelada atribuindo resistência aleatória a zonas aleatoriamente distribuídas, considerando que a rotura acontece sempre em zonas de nós. Isaksson (1999) apresentou um modelo estatístico para modelação da variabilidade da resistência à flexão intra e inter peças de madeira. O modelo é baseado no estudo anterior de Riberholt e Madsen (1979), considerando que a peça de madeira é composta por zonas com defeitos ligadas por segmentos de madeira limpa. O modelo desenvolvido tem como variáveis aleatórias 1) distância entre secções com defeitos 2) comprimento das secções com defeitos 3) resistência à flexão das secções com defeitos 4) resistência à flexão da zona entre as secções com defeitos. A modelação da variabilidade da resistência à flexão inter e intra elementos é baseada na observação de que a correlação entre secções com defeitos é independente da distância entre secções. Da aplicação do modelo obtém-se o perfil de resistência. A resistência à flexão é obtida pelo carregamento máximo que a peça pode suportar, ou seja, até ser igualada a resistência à flexão de uma secção. O autor concluiu que o comprimento das secções com defeitos não é relevante

Kline *et al.* (1986) usaram um modelo de segunda ordem de Markov para gerar a variabilidade do módulo de elasticidade ao longo do comprimento de madeira serrada de western hemlock. Para tal, efectuaram a medição do módulo de elasticidade em cada troço de 76,2cm de comprimento de uma viga, tendo sido considerada a correlação entre os módulos de elasticidade dos troços através de funções de autocorrelação. Showalter *et al.* (1987) estenderam o modelo de Kline *et al.* (1986) para a geração de valores de resistência à tracção. São gerados os valores de resistência à tracção com base em correlações com o módulo de elasticidade para cada troço de 76,2 cm e é considerado o menor valor da peça como sendo o valor de resistência à tracção. Lam e Varuglu (1991) desenvolveram um modelo para gerar valores de resistência à tracção em troços de 0,61m em vigas de 6,1m de comprimento de spruce-pine-fir. O modelo necessita da correlação entre a resistência à tracção mínima e média, do desvio padrão da resistência à tracção ao longo de uma peça de madeira e da correlação entre a resistência à tracção de zonas do elemento de madeira. Foram obtidas boas concordâncias entre os dados gerados pelo modelo e os resultados experimentais.

Lam e Barret (1992) efectuaram a modelação da variação da resistência à compressão ao longo do comprimento de madeira serrada de spruce-pine-fir. Foi usada a técnica de kriging e de remoção de tendência. O kriging é um método de interpolação que permite estimar o valor de variáveis, mediante a sua aproximação espacial, através de regressões lineares, considerando que variáveis mais próximas estão mais relacionadas que variáveis mais afastadas. A verificação do modelo foi feita em 54 elementos 38x89mm de madeira serrada de spruce-pine-fir com 4,876m de comprimento. Cada elemento foi cortado em 32 provetes de 152,4mm de comprimento e ensaiado à compressão. Para input do modelo apenas foram usados provetes alternados. Foram igualmente determinadas a média, o desvio padrão e o mínimo da resistência do elemento. O modelo foi usado para estimar a resistência dos 16 provetes que não foram incluídos no *input*. A comparação da resistência à compressão dos elementos com a obtida pelo modelo revelou uma boa correspondência entre valores. Os coeficientes de determinação entre a média, desvio padrão e mínimo da resistência à compressão simulada para os elementos de madeira, e as congéneres experimentais foram de 0,95, 0,77 e 0,82, respectivamente. Estas técnicas permitem a geração de valores de propriedades em localizações onde não é possível obter dados experimentalmente.

Winn *et al* (2004) desenvolveram o programa ALOG (Artificial LOg Generator) em Microsoft® excel para geração aleatória de toros para uso como input em programas de simulação de serração. Este programa permite gerar o comprimento, adelgaçamento, curvatura, nós e a sua colocação na superfície do toro.

Em resumo, existem modelos que permitem a determinação da resistência à flexão (Riberholt e Madsen, 1979 e Czmocho *et al.*, 1991) tendo em conta a distribuição longitudinal de defeitos, modelos que permitem simular a variabilidade longitudinal do módulo de elasticidade (Kline *et al.*, 1986), da resistência à tracção (Showalter *et al.*, 1987 e Lam e Varuglu, 1991) e compressão (Lam e Barrett, 1992) com base em medições dessas propriedades em troços de elementos e, finalmente, modelos que permitem gerar características visuais em toros (Winn *et al.*, 2004). No entanto, nenhum dos modelos apresentados permite a geração de toros virtuais e a determinação do módulo de elasticidade e resistência à flexão desses toros. O SIMPOLE permite colmatar esta lacuna. Este programa terá como principal aplicação a determinação das características mecânicas de toros procedentes de uma floresta, conhecendo as distribuições estatísticas dos defeitos e das características mecânicas da madeira limpa. Este artigo apresenta os princípios e procedimentos do software desenvolvido.

2. Características da madeira a ser consideradas no modelo

A madeira de secção circular não torneada pode possuir problemas em termos de ovalidade, adelgaçamento e curvatura. A ovalidade resulta do crescimento excêntrico do toro, geralmente causado por factores externos. O adelgaçamento é traduzido pela forma acentuada de cone que o elemento apresenta. A curvatura representa uma perda de alinhamento do elemento de madeira. Estudos realizados com madeira de secção circular de Pinheiro bravo revelaram fracas correlações, na ordem de $r=0.33$, entre estas características geométricas e a resistência da peça (Morgado *et al.*, 2009).

O lenho juvenil corresponde geralmente à zona dos primeiros 20 anéis de crescimento, podendo este valor variar consoante a espécie. Após estes primeiros 20 anos começa o crescimento do lenho adulto. O lenho juvenil caracteriza-se por baixa massa volúmica, baixa resistência e módulo de elasticidade. Larson *et al* (2004) obtiveram um coeficiente de determinação de $r^2=0,253$ entre a percentagem de lenho juvenil da secção e a resistência à flexão.

O fio torcido ocorre quando as fibras se dispõem segundo linhas helicoidais em torno do eixo do toro. Pode resultar de anomalias de crescimento, como a curvatura do tronco, de factores genéticos ou da influência de factores externos. A inclinação do fio apresenta-se como um factor penalizador da resistência devido à madeira constituir um material anisotrópico, apresentando diferenças consideráveis, em termos de propriedades mecânicas, consoante é solicitada paralela e perpendicularmente às fibras. A perda de resistência mecânica, devido à inclinação do fio, é geralmente determinada através da equação de Hankinson desenvolvida para o caso da compressão paralela às fibras. A fórmula de Hankinson foi estendida por Kollman em 1984 (Foley, 2003) para a aplicação à tracção. No caso particular da madeira de secção circular o efeito do fio torcido tende a ser menos gravoso que no caso da madeira serrada. Isto deve-se a que no caso

da madeira de secção circular não existe corte das fibras, como existe no caso da madeira serrada. Estudos realizados com madeira de secção circular de Pinheiro bravo apresentam correlações na ordem de $r=0.33$, entre o fio torcido e a resistência da peça (Morgado *et al.*, 2009).

A taxa de crescimento é uma característica visual que expressa a espessura média dos anéis de crescimento. Estudos realizados com madeira de secção circular de Pinheiro bravo (Morgado *et al.*, 2009) revelam que a taxa de crescimento é a característica visual com melhor correlação com as propriedades de resistência e rigidez dos elementos de madeira. A taxa de crescimento também é um bom indicador de massa volúmica da peça de madeira. Esta última é um dos parâmetros mais importantes para a avaliação da qualidade da madeira, por ser de fácil determinação e estar relacionada com as propriedades mecânicas e de rigidez do material. Para a madeira de secção circular de Pinheiro bravo foram obtidos coeficiente de correlação de $r=0,7$ entre a massa volúmica e a resistência à flexão (Morgado *et al.*, 2009).

O lenho de reacção é frequentemente associado a troncos e ramos tortuosos. Este defeito é criado como resposta da árvore para levar o tronco ou ramo tortuoso a uma posição mais natural. No caso das resinosas esta característica é denominada de lenho de compressão e é normalmente encontrado na base do tronco ou ramo inclinado. O lenho de compressão possui características que permitem grandes esforços de compressão. No entanto, possui uma resistência à tracção consideravelmente inferior à da madeira normal (Foley, 2003).

As fendas possuem influência nas propriedades mecânicas da madeira. No entanto, de acordo com Bodig e Jayne (Foley, 2003) as fendas não influenciam a resistência à tracção na direcção do fio. Por outro lado, a resistência à tracção na direcção perpendicular ao fio pode ser severamente afectada, podendo mesmo ser nula no caso de fendas bastante profundas. A resistência à compressão na direcção do fio também é afectada, uma vez que a distribuição de esforços é afectada. Em termos de resistência ao corte, esta também é afectada por existir uma redução da área resistente (Newlin e Johnson, 1924). A redução na resistência à flexão depende da posição da fenda relativamente à distribuição de momentos instalada na peça, e da sua proximidade ao eixo neutro. A influência das fendas nas propriedades mecânicas é difícil de generalizar e contabilizar, dependendo da sua localização, do seu número, da sua profundidade e da sua orientação relativamente à força aplicada. Estudos realizados com madeira de secção circular de Pinheiro bravo revelam uma correlação praticamente desprezável entre a resistência à flexão e as características das fendas (Morgado *et al.*, 2009).

Os nós correspondem à porção da base de um ramo inserida no tronco da árvore. Esta massa tem um desenvolvimento sensivelmente cónico, irradiando da medula ou próximo dela. A sua influência depende do seu tamanho, localização, forma e solidez, bem como do desvio local do fio e do tipo de esforço actuante. A influência dos nós depende também do teor de água e da duração do carregamento (Hoffmeyer, 1987). Os nós são muito mais penalizadores na resistência à tracção do que na resistência à compressão (Newlin e Johnson, 1924). Segundo o Wood Handbook (USDA, 1999) a maioria das propriedades mecânicas são menores em secções contendo nós que em secções de madeira limpa devido i) à redução da área de madeira limpa na secção ii) ao desvio do fio em torno do nó iii) à concentração de tensões provocada pela descontinuidade das fibras, no caso de madeira serrada iv) à desigual distribuição de esforços na secção transversal devido a nós excêntricos. De entre estes factores redutores de resistência, tem sido admitido que o desvio do fio é o mais importante. Goodman e Bodig em 1978 (Foley, 2003) apresentaram uma expressão matemática para a variação generalizada da direcção do fio em redor dos nós no plano longitudinal-tangencial, a que apelidaram de “*Flow Grain Analogy*”. Esta teoria compara o padrão das fibras a hipotéticas linhas de fluxo de um fluido que passa ao redor de um obstáculo elíptico. Patzelt e Olbrich (1998) desenvolveram um modelo que permite determinar a redução na resistência à flexão da madeira de secção circular usando o número e diâmetro dos nós. Xu (2002) desenvolveu um modelo para avaliação do efeito dos nós no módulo de elasticidade longitudinal tendo em conta o efeito do ângulo dos ramos inseridos no tronco e o volume dos nós, usando uma lei de misturas modificada. Hatayama (Foley, 2003) apresentou um procedimento baseado na relação entre a resistência da madeira serrada e a inclinação do fio em torno dos nós para a determinação da resistência à flexão. O elemento é dividido em tiras e a resistência de cada tira é determinada em função do desvio do fio induzido pelo nó através da fórmula de Hankinson. São aplicados incrementos de carga, sempre que uma tira rompe é

excluída e os esforços repartidos, seguindo-se novo incremento de carga até existir rotura da secção.

3. Modelo

O programa SIMPOLE (SIMulation of POLEs) foi desenvolvido em Microsoft® Excel, fundamentalmente em VBA (Visual Basic for Applications). Trata-se de um modelo matemático e probabilístico com simulações de Monte Carlo que permite estimar o módulo de elasticidade e a resistência à flexão de toros de Pinheiro bravo. Na sua estruturação foram considerados dois módulos, um módulo de geração de toros e um módulo respeitante à modelação de toros.

No módulo de geração de toros procede-se geração da geometria do toro, características físicas e distribuição de nós. Em termos de geometria é gerado o diâmetro, adelgaçamento e comprimento. Nas características físicas é gerada a massa volúmica do toro sendo esta considerada constante ao longo do seu comprimento. Relativamente aos nós, é gerado o seu número, espaçamento longitudinal, diâmetro e posição na secção transversal. O programa permite, igualmente, que estas características possam ser inseridas pelo utilizador de modo a trabalhar com características de toros conhecidas à partida.

No módulo de ensaio de toros procede-se à determinação do módulo de elasticidade e resistência à flexão dos toros gerados/inseridos no módulo anterior. Neste módulo os toros são discretizados em troços de madeira limpa e em troços de madeira com nós. A cada um desses troços são atribuídos valores de resistência à flexão e módulo de elasticidade. No caso de troços com nós é aplicada uma penalização tendo em conta a configuração existente dos nós. Posteriormente é efectuada a modelação do toro como sendo um elemento constituído por secções justapostas com determinadas características mecânicas. Desta modelação obtém-se o módulo de elasticidade e a resistência à flexão do toro, bem como a localização e causa da rotura.

No programa assumiu-se que os ramos são perpendiculares ao eixo da peça, estando ao mesmo nível no verticilo. Os nós foram considerados como um cone com o vértice no eixo da peça, não sendo considerada qualquer relação do seu tamanho com a sua posição na peça. Considerou-se, igualmente, que os nós apenas resistem em compressão. A excentricidade provocada na secção por assimetria das propriedades e localização dos nós também não foi tida em conta, bem como a concentração de tensões que se verifica na periferia dos nós. Em termos de comportamento mecânico da madeira, foi admitido que esta possui comportamento elástico perfeitamente plástico em compressão, sendo o módulo de elasticidade e a resistência da peça constantes ao longo do comprimento, salvo quando ocorrem nós. Em termos de defeitos, não foi considerado o efeito de fendas e lenho de reacção, da ovalidade, adelgaçamento, curvatura e fio torcido por possuírem fraca correlação com a resistência (Morgado *et al.*, 2009). O efeito do lenho juvenil não foi considerado por se considerar que a resistência é condicionada pelas fibras extremas.

3.1. Geração das características do toro

A técnica de Monte Carlo (Fisherman, 1996) permite obter soluções aproximadas para uma determinada variável aleatória através de amostragens experimentais efectuadas num computador. O procedimento consiste em obter amostras experimentais a partir das quais o valor da variável aleatória é determinado. As amostragens são efectuadas através de números pseudo-aleatórios gerados pelo computador.

Geralmente, os computadores apenas geram valores aleatórios segundo distribuições uniformes no intervalo [0,1], para a geração de valores segundo distribuições normais ou lognormais é necessário usar um algoritmo auxiliar. Para tal foi usado o algoritmo polar (Ripley, 1987) segundo o qual é possível gerar uma variável respeitando uma determinada média e desvio padrão através de duas variáveis independentes geradas segundo uma distribuição uniforme no intervalo [-1,1].

Com base no processo referido de gerar variáveis aleatórias, são gerados, numa fase inicial, o adelgaçamento, a massa volúmica do toro e o maior diâmetro do toro. Após esta fase, é gerada a distância longitudinal dos nós em função da qual o toro é dividido em troços de madeira limpa e em troços com nós. Na Figura 1 é apresentado um esquema resumo dos outputs do módulo de geração de toros.

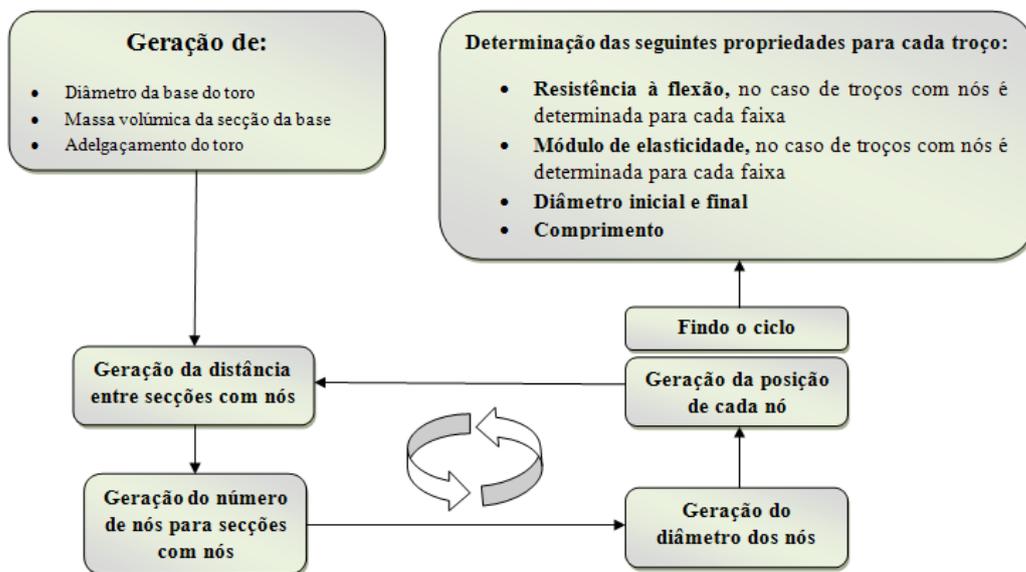


Figura 1 - Esquema do algoritmo de geração de toros

3.2. Modelação de toros

O toro é dividido em troços de madeira limpa e em troços com nós. O comprimento de cada troço com nós é considerado igual ao diâmetro da área de influência do maior nó da secção. Em termos transversais, considera-se que o diâmetro da área de influência ($dA_{\text{influência}}$) é descrito ao longo do perímetro da secção (Figura 2). A área de influência de um nó foi determinada através da equação (2), proposta por Franco e Pellicane (1993). O comprimento das secções de madeira limpa é determinado pela distância entre nós subtraída de metade do comprimento de cada uma das secções com nós adjacentes.

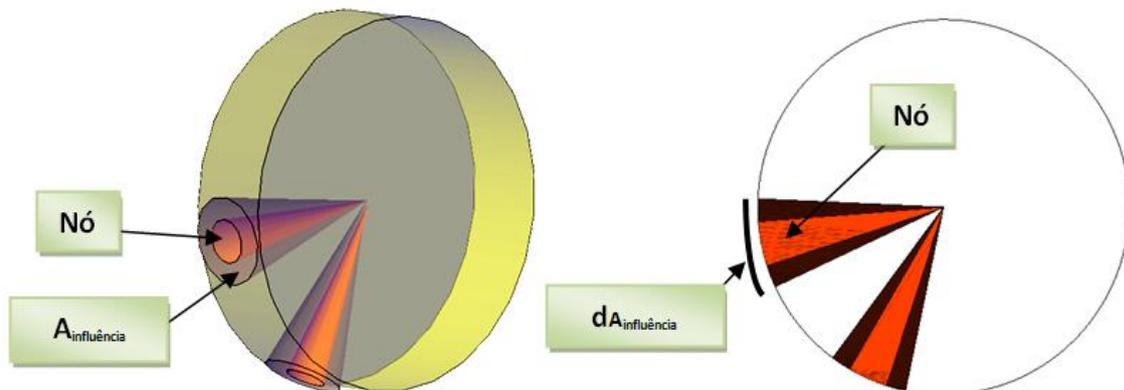


Figura 2 – Representação esquemática de nós e áreas de influência

A resistência à flexão da madeira limpa é obtida de ensaios de provetes de madeira isentos de nós. A resistência à flexão da área de influência dos nós é determinada através da aplicação da fórmula de Hankinson, equação (1). Esta fórmula necessita dos seguintes parâmetros:

- O valor da propriedade da madeira limpa segundo a direcção do fio, P_0 , conhecida.
- O valor dessa propriedade na direcção perpendicular ao fio, P_{90} , obtido apenas com base em bibliografia.
- O expoente n , obtido apenas com base em bibliografia.
- O ângulo θ do desvio do fio provocado pelo nó, obtido de Franco e Pellicane (1993).

$$P_{\theta} = \frac{P_0}{\sin^n(\theta) \times \frac{P_0}{P_{90}} + \cos^n(\theta)} n \quad (1)$$

O valor de n recomendado pelo Wood Handbook (USDA, 1999) para o módulo de elasticidade é de 2, para o caso da resistência à flexão é recomendado o valor de 1,5-2.

O valor de P_0/P_{90} recomendado pelo Wood Handbook (USDA, 1999) para o módulo de elasticidade varia entre 8 e 25, da norma EN338 (CEN, 2003b) obtém-se o valor de 30.

Franco e Pellicane, 1993 usando o método dos elementos finitos e a *flow grain analogy* (teoria que compara o padrão das fibras a hipotéticas linhas de fluxo de um fluido que passa em redor de um obstáculo elíptico) obtiveram a equação (2) para o cálculo da área de influência que cada nó possui na orientação das fibras circundantes, sendo o desvio máximo do fio provocado por um nó dado pela equação (3).

$$A_{\text{influência de um nó}} = 2,742d^2 + 1,753 \quad (\text{d-diâmetro do nó em mm}) \quad (2)$$

$$\theta = \frac{A_{\text{influência do nó}}}{A_{\text{influência do nó de 5,08cm}}} \times 54,5^\circ \quad (3)$$

Nos troços com nós a secção é discretizada em faixas com 5mm de altura, em cada uma das faixas é determinada a área de madeira limpa (A_{limpa}), a área de influência de nó ($A_{\text{inf,nós}}$) e a área de nó ($A_{\text{nós}}$). A área de influência do nó e a área de nó em cada faixa foi obtida com base no método de Gauss (Xerez, 1959). Para a aplicação deste método foi necessário identificar todas as figuras poligonais possíveis de definir pela intercepção entre os limites da área de influência do nó e os limites da faixa, de modo a obter as coordenadas dos vértices. Determinadas a área de influência do nó e a área de nó na faixa, a área de madeira limpa é dada pela área da faixa deduzida das duas primeiras.

A resistência à flexão, considerada constante em toda a faixa, é obtida por meio de uma média ponderada com base nas áreas de madeira limpa e nó. Assim, caso a faixa se situe em zona de tracção, a resistência à flexão da faixa é dada pela equação (4), caso a faixa se situe em zona de compressão, será dada pela equação (5). Esta diferença resulta de se ter assumido que em tracção o nó não contribui para a resistência. O processo é análogo para o módulo de elasticidade.

$$fm_{\text{faixa, tracção}} = \frac{fm_{\text{limpa}} \times A_{\text{limpa}} + fm_{\text{nós}} \times (A_{\text{inf,nós}})}{A_{\text{faixa}}} \quad (4)$$

$$fm_{\text{faixa, comp.}} = \frac{fm_{\text{limpa}} \times A_{\text{limpa}} + fm_{\text{nós}} \times (A_{\text{inf,nós}} + A_{\text{nós}})}{A_{\text{faixa}}} \quad (5)$$

$$fm_{\text{nós}} = \frac{fm_{\text{limpa}}}{\sin^n(\theta) \times \frac{fm_0}{fm_{90}} + \cos^n(\theta)} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{A_{\text{influência do nó}}}{95,51} \times 54,5^\circ \quad (7)$$

3.2.1. Determinação do módulo de elasticidade

Os toros são ensaiados assumindo as condições definidas para o esquema de ensaio preconizado na norma EN 14229 (CEN, 2010), o qual está indicado na Figura 3. Trata-se de um elemento rectilíneo, com 3 graus de liberdade cuja secção varia uniformemente com o comprimento, segundo um determinado adelgaçamento.

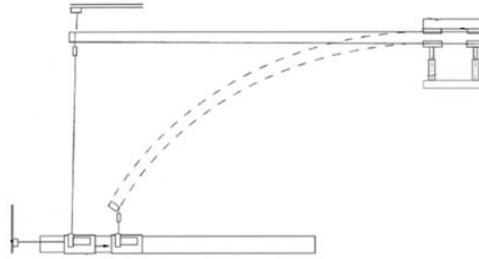


Figura 3 – Esquema de ensaio de postes

O módulo de elasticidade, segundo a norma EN 14229 (CEN, 2010), é determinado com base nos valores do deslocamento vertical e horizontal na extremidade livre da consola. Como neste caso são expectáveis elevadas deformações, uma análise no domínio das pequenas deformações poderia conduzir a erros significativos, pelo que é necessário efectuar uma análise não linear geométrica. Para tal, foi seguido o procedimento apresentado por Fertis (2006), mas adaptado a vigas de secção circular com adelgaçamento.

3.2.2. Determinação da resistência à flexão

Para a determinação da resistência à flexão, o toro é sujeito sucessivamente a incrementos de carga de valor tal que assegure erros inferiores a 1%. Em cada incremento é efectuada a verificação das tensões ao longo do comprimento do toro. Contudo, como o cálculo do momento aplicado é efectuada sobre a projecção da deformada (Figura 4) e o comprimento do elemento não é igual à projecção da deformada, é necessário encontrar uma correspondência entre as coordenadas na situação deformada e a situação indeformada. Fertis (2006) sugere que a relação entre a coordenada $x_{deformada}$ de um ponto na situação deformada e a coordenada $x_{indeformada}$ na situação indeformada pode ser obtida pela equação (8), com erro inferior a 3%.

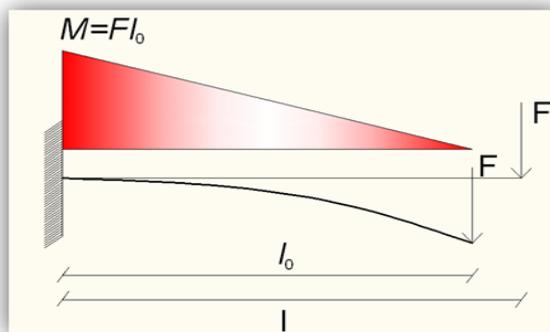


Figura 4 – Esforços na configuração deformada

$$x_{indeformada} = x_{deformada} + (l - l_0) \sin\left(\frac{\pi x}{2l_0}\right) \quad (8)$$

No caso das secções de madeira limpa, a rotura acontece quando a tensão actuante na fibra de extremidade ultrapassar a resistente. No caso de secções com nós, a determinação da condição de rotura requer a verificação das tensões nas faixas que constituem a secção. Assim, quando a tensão actuante numa faixa superar a tensão resistente podem ocorrer duas situações distintas: rotura da faixa, no caso de esta se encontrar em tracção, ou plastificação, no caso de se encontrar em compressão. Em qualquer destas duas situações tal não significa necessariamente a rotura da secção uma vez que, após redistribuição de esforços, as faixas restantes podem suportar a

tensão actuante adicional. Quando uma faixa rompe ou plastifica, neste caso a tensão é mantida constante, o programa procede ao cálculo do novo diagrama de tensões actuantes (Figura 5).

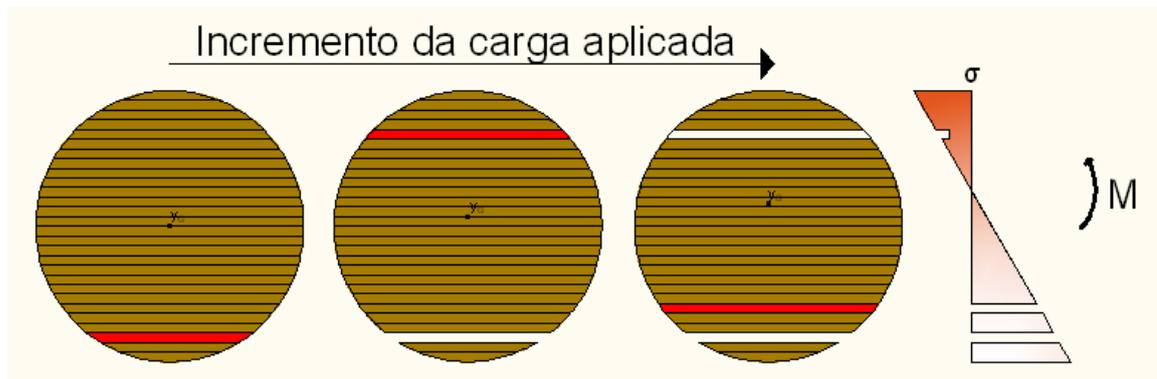


Figura 5 – Evolução do diagrama de tensões actuantes numa secção transversal devido ao acréscimo de carga aplicada, consoante faixas rompem ou plastificam (faixas a vermelho)

Quando se verifica que a força máxima a que uma secção resiste já foi atingida, o cálculo termina com *output* final da tensão de rotura, da localização da rotura e da identificação se a rotura se situou em zona de madeira limpa ou nós.

4. Notas finais

Neste artigo é apresentado o SIMPOLE (SIMulator of POLEs), um programa de computador, construído em VBA (Visual Basic for Applications) do Microsoft Excel®, constituído por 2 módulos.

O primeiro módulo é responsável pela geração da geometria do toro, massa volúmica e distribuição de nós ao longo do seu comprimento. Estas características podem ser, igualmente, especificadas pelo utilizador.

O último módulo permite o ensaio do toro gerado ou inserido segundo o preconizado na norma EN14229. O SIMPOLE tem como *output* final a resistência à flexão e o módulo de elasticidade do toro, bem como a localização e causa da rotura.

O programa ainda não se encontra concluído, pretendendo-se adicionar a possibilidade de ensaio de toros como vigas simplesmente apoiadas segundo a norma EN14251 (CEN, 2003a). Para além disso, este programa será aplicado a uma amostra real de toros de modo a calibrar e validar as formulações propostas para a contabilização dos defeitos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/44909/2008 e do Projecto de Investigação PTDC/ECM/099833/2008.

Referências Bibliográficas

- CEN (2003a). "Structural round timber – Test methods." EN14251. Comité Européen de normalization.
- CEN (2003b). "Structural timber – Strength classes." EN338. Comité Européen de normalization.
- CEN (2010). "Structural timber – Wood poles for overhead lines." EN 14229. Comité Européen de normalization.
- Czmoch, I., Thelandersson, S. e Larsen, H. J. (1991), "Effect of within member variability on bending strength of structural timber." CIB W18 / 24-6-3.
- Fertis, D. G.(2006), "Nonlinear Structural Engineering," Springer. Alemanha.
- Fisherman, G. S.(1996), "Monte Carlo: concepts, algorithms and applications," Springer. New York.
- Foley, C. (2003), "Modeling the effects of knots in structural timber." Division of structural Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, Doctoral Thesis.
- Franco, N. e Pellicane, P. J. (1993), "Three-dimensional model for wood-pole strength predictions." Journal of structural Engineering, vol.119, n.º 7, pp. 2199-2214.
- Hoffmeyer, P. (1987). "The role of grain angle, knots, tension wood, compression wood, and other anomalies on the mechanical properties of wood. ." Technical University of Denmark. Building Materials Laboratory.

- Isaksson, T. (1999), "Modelling the variability of bending strength in structural timber." Division of structural Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, Doctoral Thesis.
- Kline, D. E., Woeste, F. E. e Bendtsen, B. A. (1986), "Stochastic model for modulus of elasticity of lumber." Wood and Fiber Science, vol.18, n.º 2, pp. 228-238.
- Lam, F. e Barrett, J. D. (1992), "Modeling lumber strength spatial variation using removal and kriging analysis." Wood Science and Technology, vol.26, n.º 5, pp. 369-381.
- Lam, F. e Varuglu, E. (1991), "Variation of tensile strength along the length of lumber - Part 2: Model development and verification." Wood Science and Technology, vol.25, n.º 5, pp. 449-458.
- Larson, D., Mirth, R. e Wolfe, R. (2004a), "Evaluation of small-diameter ponderosa pine logs in bending." Forest Products Journal vol.54, n.º 1 2, pp. 52-58.
- Morgado, T., Rodrigues, J., Machado, J., Dias, A. e Cruz, H. (2009), "Bending and compression strength of Portuguese Maritime pine small-diameter poles." Forest Products Journal, vol.59, n.º 4, pp. 23-28.
- Newlin, J. e Johnson, R. (1924). "Structural timbers. Defects and their influence on strength." Research paper R1041. USDA Forest Service.
- Patzelt, M. e Olbrich, R. (1998), "Influence of knots on bending strength of small diameter roundwood as basis for a simple strength grading model." WCTE 1998, Suíça, 714-715.
- Riberholt, H. e Madsen, P. H. (1979). "Strength distribution of timber structures - Measured variation of the cross sectional strength of structural lumber." Rapport R114. Technical University of Denmark.
- Ripley, B. D.(1987), "Stochastic Simulation," Wiley. New York.
- Showalter, K. L., Woeste, F. E. e Bendtsen, B. A. (1987). "Effect of length on tensile strength in structural lumber." Research Paper FPL-RP-482. Forest Products Laboratory.
- USDA (1999), Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Wood handbook : wood as an engineering material, Forest Products Laboratory, Madison, pp. 4.1-4.45.
- Winn, M. F., Wynne, R. H. e Araman, P. A. (2004), "ALOG: A spreadsheet-based program for generating artificial logs." Forest Products Journal, vol.54, n.º 1, pp. 62-66.
- Xerez, A. C.(1959), "Topografia Geral Vol. I," Técnica. Lisboa.
- Xu, P. (2002), "Estimating the influence of knots on local longitudinal stiffness in radiata pine structural timber." Wood Science and Technology, vol.36, n.º 6, pp. 501-509.