

Análise numérica de uma ligação de treliça com chapas metálicas dentadas: caso de estudo de uma ligação tipo heel joint.

Numerical analysis of a truss joint using gang-nail plates: case study of a heel joint.

L. C. Paiva¹ | M. T. Braz-César² | A. M. V. Paula³

¹Aluno de Mestrado em Engenharia da Construção, ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

²Professor Adjunto, ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

³Professor Adjunto, ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

resumo

Treliças em madeira com ligações tradicionais por pinos são geralmente modeladas como pórticos de ligações rígidas, e os esforços nas barras são depois transmitidos para o dimensionamento das ligações. Outras metodologias recomendam que a análise seja feita com mais rigor, levando em conta a distribuição de tensões, comportamento da madeira e a avaliação da distribuição de esforços na ligação. Há uma grande gama de informação relacionada às ligações do tipo pinos, mas a análise mecânica dos esforços em ligações com chapas metálicas dentadas ainda está em desenvolvimento. O presente documento compara duas metodologias para a distribuição de esforços nas linhas de ruptura de ligações com chapas metálicas dentadas, utilizando uma abordagem analítica e um método numérico, utilizando software comercial Midas/Gen. Os resultados apresentam a validação do modelo analítico para o caso mais simples de uma linha de ruptura, mas confrontam as premissas da redistribuição dos esforços entre linhas adjacentes.

Palavras-chave:

abstract

Wooden trusses with traditional pin connections are generally modeled as pinned joints, and the forces on the bars are then transmitted for the connection's design. Other methodologies recommend that the analysis should be done more rigorously, taking into account the stress distribution, the behavior of the wood and the evaluation of the distribution of stresses in the connection area. There is a wide range of information related to pin-type connections, but the mechanical analysis of stress distribution in punched metal plate fasteners is still under development. The present paper compares two methodologies for the stress distribution in the rupture lines of punched metal plate fasteners, using an analytical approach and a numerical method by the commercial software Midas/Gen. The results present the validation of the analytical model for the simplest case of a single rupture line, but confront the premises of stress redistribution between adjacent lines.

Keywords:

1- INTRODUÇÃO

A madeira é provavelmente o material de construção mais antigo, que data da pré-história, onde registra-se que árvores caídas eram usadas como ponte de acesso a novas regiões. A evolução de seu uso como elemento estrutural está, não obstante, vinculada ao desenvolvimento de técnicas mais eficientes de ligação. A motivação de estudo para ligações em madeira advém da indisponibilidade de peças que sejam compatíveis com os requisitos de projeto, quer pela geometria estrutural, quer pela elevada capacidade resistente (Porteous, 2007).

De entre os tipos de conectores mecânicos, as chapas metálicas dentadas (CMD) são as mais eficientes. Estas placas são comumente utilizadas na fabricação de treliças pré-fabricadas em madeira, e seu baixo custo e fácil produção são as maiores vantagens em relação aos demais tipos de ligações mecânicas (Callahan, 1993).

As CMD são placas de aço galvanizado com espessuras entre 1mm e 4mm, com dentes perpendiculares à placa que possuem tamanho entre 4mm e 10mm. Estas chapas são pressionadas uma de cada lado na madeira por meio de prensas e, por tal motivo, sua produção é feita exclusivamente em sítios de estruturas pré-fabricadas. A Figura 1 ilustra um modelo de chapa metálica dentada retangular, usada em treliças de madeira. As ligações CMD mobilizam uma grande área de contato da madeira, razão pela qual esta ligação é mais eficiente que as demais.

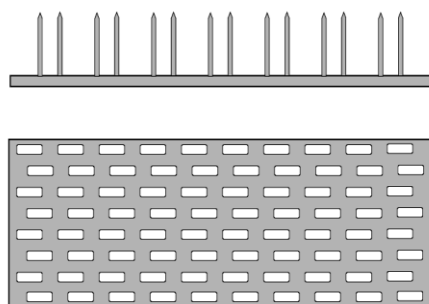


Fig. 1 | Chapa metálica dentada retangular.

O principal ponto de estudo das CMD é a redistribuição de esforços dos elementos em madeira para as placas. Esta distribuição é não-linear e não-constante ao longo da largura e do comprimento da placa (Onat, 2016; Gebremedhin, 1991).

(Mirsa e Esmay, 1966) procederam um dos primeiros estudos analíticos para a distribuição de tensões em CMD, utilizando o princípio da mínima energia complementar. A modelagem considerou uma única geometria de placa, e a análise baseou-se na suposição que a ligação operava em regime elástico-linear. As curvas teóricas sugeriram algumas teorias de como os esforços são transmitidos na placa, mas ajustaram muito bem os dados experimentais. Um dos motivos foi pela aproximação linear-elástica e pela consideração do comportamento rígido da placa.

Nesses estudos, o enfoque é na modelagem da interface dente-madeira, onde as propriedades mecânicas da madeira e a compatibilidade geométrica das deformações tornam a análise complexa.

As normas atuais fornecem equações para o cálculo da capacidade resistente da chapa partindo dos esforços nas linhas de ruptura. A modelagem da transmissão dos esforços da madeira para a chapa é documentada na terceira parte da norma francesa DTU 31.3 e, em seguida, deve-se proceder com a redistribuição dos esforços nos centros de gravidade da placa para suas linhas de ruptura (DTU 31.3 P3, 2012).

2- METODOLOGIA

Como mencionado, as normas vigentes tratam do cálculo da capacidade resistente da chapa partindo da distribuição de tensões nas linhas de ruptura. Pretende-se, portanto, neste trabalho, comparar duas metodologias de análises das linhas de ruptura. A primeira, partindo de um princípio simplificador em que todas as linhas se deformam em simultâneo, podendo-se proceder à distribuição analítica de tensões de uma linha isolada para as demais, de forma a garantir o equilíbrio.

A segunda, com uma abordagem numérica utilizando o *software* Midas/Gen, calculando cada região de ruptura em separado. O objetivo principal é verificar como a premissa das deformações simultâneas altera a distribuição de esforços frente a uma análise numérica de cada região da placa.

A geometria de placa estudada está ilustrada na Figura 2.

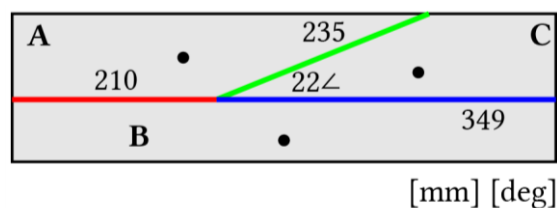


Fig. 2 | Comprimentos das linhas de ruptura.

2.1 Modelo Analítico

Considera-se o modelo ilustrado na Figura 3. O objetivo é distribuir os esforços dos centros geométricos das regiões (A, B e C) para as linhas de ruptura (em vermelho, azul e verde). O problema é inicialmente hiperestático, e a interdependência das linhas torna a solução indeterminada. Adota-se, então, um critério simplificador. Admitindo que todas as linhas se deformam em simultâneo, é possível calcular uma região e transportar os esforços obtidos para as demais linhas. Por falta de condições de contorno suficientes, deve-se iniciar o cálculo pela região B.

Inicialmente, transladam-se as cargas (descritas no Quadro 1) para o centro geomé-

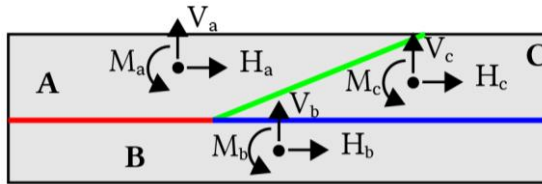


Fig. 3 | Esforços nos centros geométricos da placa.

Quadro 1 | Relação numérica dos esforços nos centros de gravidade.

H_a	-28,2 kN
V_a	7,67 kN
M_a	-0,7 kN.m
H_b	26,2 kN
V_b	-6,34 kN
M_c	-0,2 kN.m
H_c	2,22 kN
V_c	-1,51 kN
M_b	-0,22 kN.m

trico da linha. Em seguida, adota-se um comportamento plástico para a distribuição, e calculam-se as cargas distribuídas equivalentes ao longo da linha.

Com o princípio da superposição dos efeitos, calcula-se o transporte das forças e os devidos momentos por elas gerados:

$$\sigma_{m,b} = \frac{4 \cdot (H_b \cdot e - M_b)}{\ell^2} = \frac{4 \cdot (26,2 \cdot 0,0345 - 0,20)}{0,559^2} = 9 \text{ kN/m} \quad (1)$$

$$\sigma_b = \frac{V_b}{\ell} = -11,3 \text{ kN/m} \quad (2)$$

$$\tau_b = \frac{H_b}{\ell} = 46,9 \text{ kN/m} \quad (3)$$

Admitindo agora que as linhas são interdependentes na deformação, é possível transportar estes esforços para as demais regiões, tornando sua solução isostática.

2.2 Modelo Numérico

Com o auxílio de uma ferramenta de análise estrutural, é possível iniciar o cálculo por qualquer região arbitrária, pois o problema hiperestático, originalmente sem condições de contorno suficientes, pode ser abordado por um método aproximado a seguir definido.

Discretiza-se o domínio em elementos de largura fixa (neste caso 15mm) e faz-se a união dos novos nós (*slave nodes*) com um elemento rígido, ligando-os ao nó central que coincide com o centro geométrico da região (*master node*), como ilustrado na Figura 4.

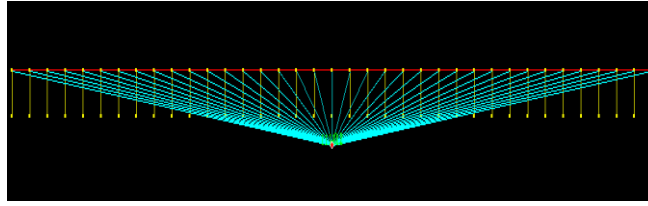


Fig. 4 | Modelagem da região B no *software* Midas/Gen 7.2.5.

Adicionalmente, para evitar trabalhar com deformações, adicionam-se elementos de mola conectando os nós a suportes fixos, pois desta forma, obtém-se diretamente as forças reativas. A rigidez destas molas é fundamentada na norma alemã DIN 1052:2008-12, seção 2.3.4.1:

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_{ser}}{\gamma_m} \quad (4)$$

$$K_x = K_y = 2 \cdot K_u \cdot A_{anc} \quad (5)$$

Estes valores dependem das propriedades mecânicas da chapa. k_{ser} é o módulo de desprendimento da placa (*slip modulus*), K_u é o módulo de desprendimento de cálculo e A_{anc} é a área de ancoragem efetiva da região estudada.

Com o elemento de mola ligado à extremidade de um suporte, o programa realiza o produto da deformação da mola pela sua rigidez, obtendo-se assim diretamente a força nodal.

A modelagem com as conexões rígidas faz com que o comportamento da barra seja rígido, portanto não haverá deflexões entre os nós intermediários. Conseqüentemente as deformações serão lineares e, conectadas às molas que operam se formam segunda uma lei constitutiva linear, a distribuição dos esforços deverá ser também linear.

3- ANÁLISE DE RESULTADOS

Compara-se então os diagramas de esforços atuantes nas linhas de ruptura da região B pelas duas metodologias.

Para compatibilizar a análise dos dois métodos, os resultados obtidos numericamente utilizando o *software* Midas/Gen foram tratados de forma apresentarem um resultado distribuído. Este resultado foi obtido pela razão entre a área de influência de cada nó e sua respectiva força concentrada. Os resultados estão ilustrados nas Figuras 5 e 6.

Apesar dos esforços distribuídos serem equivalentes pelo princípio da superposição, nota-se uma divergência no posicionamento do eixo neutro da linha.

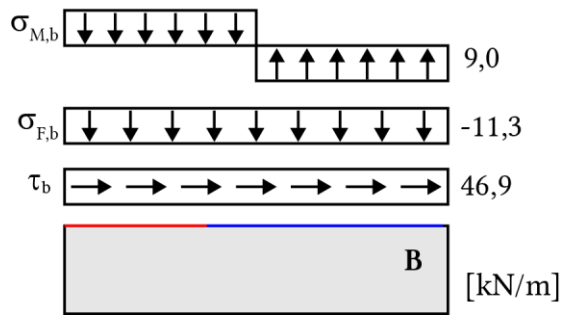


Fig. 5 | Esforços na linha de ruptura da região B pelo método analítico.

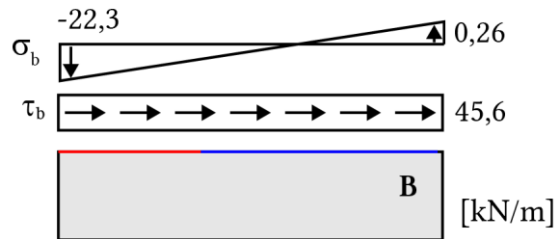


Fig. 6 | Esforços na linha de ruptura da região B pelo método numérico em Midas/Gen.

4- CONCLUSÕES

Ambas as modelagens fornecem resultados aproximados ao se tratar do caso isostático, todavia divergem segundo o critério da análise hiperestática. A consideração do comportamento plástico não é verificada no método numérico, onde a distribuição das forças sugere uma relação elástica entre tensão e deformação.

A simplificação adotada, de que as linhas de ruptura são interdependentes do ponto de vista da deformação, fornece um resultado para apenas este modo de ruptura. Na abordagem física real do problema, as linhas de ruptura podem de fato apresentar outros modos de ruptura em simultâneo.

A divergência dos modelos sugere a necessidade da implementação de outras abordagens de cálculo, além de ensaios experimentais para a validação do modelo ideal.

REFERÊNCIAS

Porteous, Jack e Kermani, Abdy. "Structural Timber Design To Eurocode 5". 2ª ed. Macmillan International Higher Education, 2007.

- Callahan, Edward E. e Dinsmore, Pamela W.. “Metal Plate Connected Wood Truss Handbook: A Comprehensive Guide to the Design and Use of Metal Plate Connected Wood Trusses in Construction Today”. Wood Truss Council of America, 1993.
- Onat, Saadettin Murat. “Feasibility of using metal Plate Connected Timberstrand LSL joints in the truss fabrication industry”. Em: Journal of Bartın Faculty of Forestry 18.1, pp. 1–12, (2016).
- Gebremedhin, K. G. e Crovella, P. L.. “Load distribution in metal plate connectors of tension joints in wood trusses”. Em: Transactions of the ASAE 34.1, pp. 281–287 (1991).
- Misra, R. D. e Esmay, M. L.. “Stress distribution in the punched metal plate of a timber joint”. Em: Transactions of the ASAE 9.6, pp. 839–842 (1966).
- NF DTU 31.3 P3. “Timber structures connected with metal plate fasteners or gussets - Part 3: Design requirements”. Norma técnica. Association Française de Normalisation (2012).
- DIN 1052:2008-12. “Nagelplattenbinder nach”. Norma técnica. Nagelplattenprodukte, (2008).