

TRAÇÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS EM VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA CURVAS OU DE INÉRCIA VARIÁVEL



Manuel Alves
 Técnico Superior
 Laboratório Nacional de
 Engenharia Civil
 Lisboa
 mpalves@lnec.pt



Helena Cruz
 Investigadora Principal
 Laboratório Nacional de
 Engenharia Civil
 Lisboa
 helenacruz@lnec.pt



José Saporiti Machado
 Investigador Auxiliar
 Laboratório Nacional de
 Engenharia Civil
 Lisboa
 saporiti@lnec.pt

SUMÁRIO

O desenvolvimento de tração perpendicular às fibras em elementos de madeira lamelada colada tem sido reconhecido como causa de danos e acidentes graves em estruturas, merecendo por isso uma atenção especial.

Elementos curvos e elementos retos de inércia variável constituem um especial desafio, dado que potenciam o desenvolvimento de tensões perpendiculares às fibras da madeira, que podem ser críticas para a integridade dos elementos lamelados colados e a segurança estrutural. Este fenómeno é ilustrado e discutido através da modelação numérica de duas estruturas. Os modelos foram desenvolvidos com o software de cálculo automático SAP2000, recorrendo a elementos de casca e uma análise linear, assumindo um comportamento ortotrópico para o material.

Palavras-chave: Madeira lamelada colada, tração perpendicular, modelação numérica, Eurocódigo 5.

1. INTRODUÇÃO

A madeira lamelada colada permite a realização de estruturas de grande vão e formas arquitetónicas muito variadas, sendo corrente a utilização de elementos curvos, de secção constante ou variável, e de vigas de lamelas retas e secção variável de pendente simples ou dupla.

Estas formas constituem, no entanto, um especial desafio em termos de fabrico e de controlo de qualidade, requerendo ainda cuidados acrescidos no que se refere ao dimensionamento, pormenorização e exploração das estruturas, dado que potenciam o desenvolvimento de tensões perpendiculares às fibras da madeira, que podem ser críticas para a integridade dos elementos lamelados colados e conseqüentemente para a segurança estrutural.

O comportamento marcadamente ortotrópico da madeira é crítico no caso dos esforços de tração, já que a resistência à tração perpendicular às fibras, que tem valores característicos $f_{t,90,g,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ no caso de madeira lamelada colada [1] é, em média, cerca de 2% da resistência à tração paralela às fibras.

O desenvolvimento de tração perpendicular às fibras em elementos de madeira lamelada colada, com origens diversas, tem sido reconhecido como causa de danos e acidentes graves em estruturas, merecendo por isso uma atenção especial.

2. TRAÇÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS

2.1 Vigas curvas e/ou de inércia variável

Em vigas curvas e/ou de inércia variável sujeitas a momento fletor, a mudança de direção do eixo da peça dá origem a forças de desvio T , conforme é simplificada esquematizado na Figura 1.

Quando o momento fletor causa tração na face côncava ou reta do elemento, desenvolvem-se tensões de tração perpendiculares ao fio, com uma distribuição parabólica ao longo da altura da secção transversal.

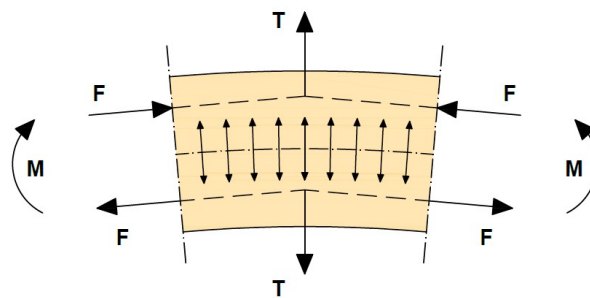


Figura 1. Forças de desvio devidas ao momento fletor e tensões de tração perpendiculares ao fio da madeira

O Eurocódigo 5 [2] impõe a verificação obrigatória dos esforços de tração perpendiculares às fibras em vigas curvas e/ou de secção variável.

As tensões atuantes de flexão são calculadas pela expressão habitual para qualquer secção de vigas retas de pendente simples e nos troços afastados da zona do cume nas restantes tipologias. Nas restantes situações devem considerar-se expressões modificadas.

A *zona do cume* corresponde a uma zona adjacente à cumeeira. Em vigas retas de pendente dupla com extradorso em cume, a extensão (comprimento) total desta zona é igual à altura da secção no cume. Em vigas com lamelas curvas, a zona do cume corresponde ao troço curvo do elemento (embora se considere limitado a 2/3 do volume total do elemento).

O valor de cálculo da tensão atuante de tração perpendicular ao fio $\sigma_{t,90,d}$ deve em geral ser obtido pela expressão (1), função do momento fletor de cálculo no cume $M_{ap,d}$, das dimensões da secção correspondente, b e h_{ap} , e de um fator k_p .

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6 M_{ap,d}}{b h_{ap}^2} \quad (1)$$

k_p é função do raio de curvatura da linha média do elemento na secção do cume e do ângulo α_{ap} entre a direção das fibras da madeira e a pendente no cume.

A verificação da segurança é traduzida pela expressão (2), sendo $\sigma_{t,90,d}$ o valor de cálculo da tensão atuante de tração perpendicular às fibras, $f_{t,90,d}$ o correspondente valor de resistência do material, k_{dis} um fator que depende da tipologia do elemento e k_{vol} um fator que depende do volume da zona do cume [2].

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d} \quad (2)$$

O Eurocódigo 5 impõe ainda a verificação da segurança para a combinação de esforços de tração perpendicular ao fio e de corte. Refira-se que a resistência ao corte é também relativamente baixa, $f_{v,g,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$ para todas as classes de madeira lamelada colada.

2.2 Ligações

Esforços de tração perpendicular podem também surgir em ligações que apliquem aos elementos forças com uma componente perpendicular às fibras. Este aspeto é naturalmente verificado no dimensionamento e pormenorização das ligações de topo entre elementos, mas frequentemente negligenciado na fixação de elementos secundários de travamento que igualmente suportem cargas verticais, ou na suspensão aleatória de equipamentos a partir da estrutura, em fase de exploração, sem os devidos cuidados.

2.3 Variações ambientais severas e retração restringida

A forma e as dimensões dos elementos de madeira variam com as variações do seu teor de água, em resposta a variações das condições ambientais. De acordo com a EN 14080 [1], essas variações podem ser calculadas, assumindo coeficientes unitários de retração/inchamento iguais a 0,0025 na direção perpendicular e 0,0001 na direção paralela às fibras (para cada de 1% de variação do teor de água da madeira na gama entre 6% e 25%).

Poderemos assim esperar uma variação de 1% na altura nominal da secção de um elemento de madeira em resultado de uma variação hipotética de teor de água de 4% em serviço. Facilmente se compreende que, no caso da retração transversal da madeira ser impedida, nomeadamente por chapas metálicas de ligações estruturais, variações severas das condições ambientais (induzindo secagem) poderão impor à madeira esforços superiores à sua resistência à tração perpendicular às fibras, acabando esta por fender ao longo das fibras.

O Eurocódigo 5 [2] refere que as ações causadas pelo efeito de variação do teor de água da madeira devem ser tidas em conta, embora não indique como.

A variação drástica do teor de água em madeira lamelada colada tem sido apontada como capaz de introduzir tensões de tração perpendicular às fibras muito importantes, e

consequentes fendas e até rotura, mesmo que a retração não esteja restringida, simplesmente pela criação de gradientes de teor de água no interior dos elementos.

A modelação destes efeitos é muito complexa, tendo sido proposto por vários autores que seja tida em conta mediante a consideração de uma carga (ação mecânica) equivalente. No estudo [3], os autores mostraram que o efeito de ciclos de humidade pode ser equiparado aos efeitos de uma carga aplicada sob humidade constante, em termos das tensões resultantes. Mostraram que a variação do teor de água em vigas curvas, atuando simultaneamente com uma ação mecânica de 0,2 MPa, corresponde a uma carga extra de 0,14 a 0,25 MPa se a viga não estiver protegida e que uma boa proteção superficial (*moisture barrier*) reduzirá essa carga extra a 0,06 MPa.

A potencial magnitude das tensões relacionadas com as variações do teor de água aumenta com a largura do elemento (maior inércia no equilíbrio do teor de água na secção transversal). As tensões de tração na superfície ocorrem durante períodos secos, sendo críticos se a secagem for rápida e a lamela incluir a medula (mais propícia a fendas visíveis nas faces).

3. CASO DE ESTUDO 1

3.1 Descrição

A estrutura de cobertura 1 é constituída por elementos curvos de madeira lamelada colada, com raio de curvatura de aproximadamente 12 m (medido ao eixo) e cerca de 185x1035 mm² de secção transversal. A distância entre apoios varia, sendo em média da ordem de 16 m.

Neste caso, como frequentemente acontece, não existe informação sobre o fabricante, o tipo de cola usada ou a classe de resistência da madeira lamelada colada.

Após 12 anos de funcionamento, as faces laterais dos elementos curvos apresentavam fendas longitudinais ao longo ou entre lamelas, algumas das quais profundas.

Estes elementos têm a meio vão uma junta de transporte, materializada por duas chapas longitudinais embebidas junto às suas faces superior e inferior, suportando igualmente a longarina central de contraventamento (Figura 2).



Figura 2. Um dos elementos curvos, com delaminação e fendas ao longo das lamelas

Verificou-se que as fendas afetavam essencialmente os elementos curvos, ocorrendo sobretudo na metade central da altura do elemento, entre as duas chapas de ligação ou junto destas chapas, e que eram pouco expressivas nos restantes elementos apesar de se encontrarem em condições de exposição semelhantes.

Fendas deste tipo são críticas, quer por poderem afetar seriamente a capacidade resistente dos elementos curvos, quer por poderem indiciar deficiências de projeto ou de pormenorização, ou problemas de colagem entre lamelas (no caso de as fendas se desenvolverem por rotura coesiva da cola ou por rotura adesiva na interface cola/madeira, isto é, por delaminação da junta colada).

3.2 Observação e caracterização experimental

A inspeção realizada permitiu verificar que (Figura 3), nos elementos curvos, a madeira está aparafusada ao apoio numa extremidade, estando simplesmente poisada no outro apoio.



Figura 3. Apoio fixo (à esquerda) e apoio deslizante (à direita)

A par da instalação de equipamento para monitorização das condições ambientais envolventes, foram recolhidas carotes para caracterização laboratorial da cola e da junta colada (diâmetro = 35 mm) e para calibração dos ensaios de ultrassons (diâmetro = 8 mm). Os orifícios de maior diâmetro foram subsequentemente tamponados.

A identificação da cola foi realizada por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Concluiu-se que os espectros IV do material raspado da junta colada dos provetes apresentam bandas de absorção características de um poliuretano, sendo que a utilização de colas de poliuretano monocomponente está prevista na norma EN 14080 [1].

Os ensaios de corte pela junta colada segundo a EN 14080 [1], indicaram que os resultados (tensão de rotura e percentagem de rotura pela madeira) cumprem os requisitos mínimos estabelecidos. Também os ensaios de delaminação (que consistem na aplicação de ciclos de molhagem seguida de secagem a uma temperatura de 65°C, impondo gradientes de teor de água aos provetes que desenvolvem tensões internas perpendiculares às linhas de cola) não

mostraram deficiências ao nível da integridade da junta colada, cumprindo as exigências daquela norma.

Atendendo à inexistência de informação sobre a classe de resistência desta madeira lamelada colada, a estimativa da classe de resistência foi efetuada com base na realização de ensaios semi-destrutivos sobre as lamelas que a compõem. Os ensaios envolveram a realização de leituras de tempo de propagação de ondas acústicas (*stress wave*) e a extração de pequenas carotes para determinação em laboratório da massa volúmica da madeira e identificação da espécie.

O módulo de elasticidade dinâmico $E_{m,dyn}$ foi obtido através da expressão (3), sendo esta variável utilizada em modelos de regressão linear disponíveis no LNEC para inferir o módulo de elasticidade estática das lamelas, em função da respetiva massa volúmica ρ e da velocidade de propagação v .

$$E_{m,dyn} = \rho \cdot v^2 \quad (3)$$

O critério de aceitação do cumprimento dos requisitos da classe de resistência das lamelas considerou as classes de resistência das lamelas (madeira maciça) definidas na EN 338 [4], sendo a extrapolação para o lamelado colado efetuada de acordo com os critérios estabelecidos na norma EN 14080 [1].

A identificação da espécie, feita no LNEC através de cortes histológicos, permitiu admitir que os elementos de madeira analisados pertencem à espécie *Picea c.f. abies* (L.) H.Karst, madeira designada comercialmente como espruce.

Das determinações efetuadas pode admitir-se que os elementos curvos em análise são constituídos de elementos lamelados colados homogéneos da classe de resistência GL22h definida na EN 14080.

3.3 Modelo numérico

Desenvolveu-se um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos através do *software* comercial de cálculo automático de estruturas SAP2000 [5]. Utilizaram-se elementos de casca e realizou-se uma análise linear, assumindo um comportamento ortotrópico para o material.

Na modelação consideraram-se duas soluções estruturais distintas (Figura 4):

- Elemento contínuo em todo o seu desenvolvimento.
- Dois meios-arcos, ligados a meio vão por intermédio de chapas de aço.

Foram ainda consideradas duas condições de apoio distintas para os elementos curvos:

- simplesmente apoiado – apoios rotulados, com deslocamentos horizontais permitidos unicamente no apoio à direita.
- com apoios fixos – apoios rotulados, sem deslocamentos horizontais.

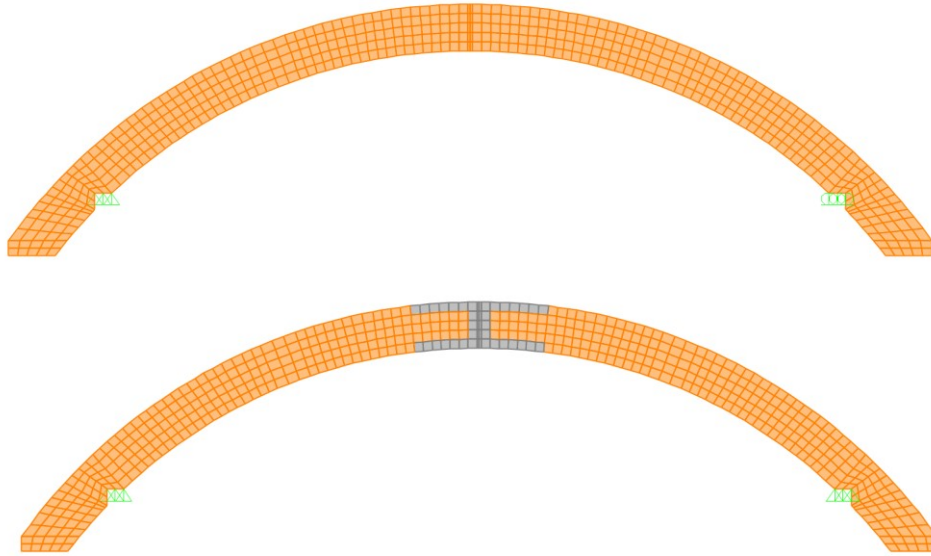


Figura 4. Representação esquemática do modelo numérico (elemento contínuo, em cima, dois meios arcos ligados por intermédio de chapas de aço, em baixo)

3.4 Materiais e ações consideradas

Para vigas curvas, o Eurocódigo 5 [2] prevê uma redução do valor de cálculo da resistência em flexão da madeira lamelada colada, em toda a zona curva, por multiplicação de um coeficiente de redução que tem em conta a flexão imposta às lamelas individuais durante o fabrico. No entanto, esse coeficiente kr será igual a 1 se o raio de curvatura do intradorso do elemento for igual ou superior a 240 vezes a espessura das lamelas, condição verificada no presente caso.

Desta forma, foram adotados nas simulações numéricas e verificações subseqüentes os valores das propriedades de resistência, de rigidez e massa volúmica indicados na EN 14080 [1] para a classe de resistência GL 22h. Foi assumido um Coeficiente de *Poisson* $\nu = 0,015$ de acordo com o estudo publicado por [6].

O peso próprio (PP) dos elementos foi considerado de forma automática pelo programa. A restante carga permanente (RCP por arco = 62 kN) foi aplicada através de cargas pontuais, suspensas das faces do elemento a uma altura semelhante à situação observada *in situ*.

A sobrecarga de utilização regulamentar (SOB), foi aplicada através de cargas pontuais, com o sentido da ação gravítica, suspensas das faces do elemento a uma altura aproximadamente igual à situação existente *in situ*, com uma intensidade de $0,4 \text{ kN/m}^2$.

Considerou-se a combinação fundamental de ações com coeficientes de segurança relativamente às ações permanentes de 1,35 dado que os pesos dos materiais são bem conhecidos e de 1,5 para as ações variáveis.

As simulações mostradas referem-se à combinação fundamental: $1,35 (\text{PP}+\text{RCP})+1,5 \text{ SOB}$.

3.5 Resultados e conclusões

Em todos os casos, a consideração das chapas na ligação da cumeeira conduz a uma grande concentração de tensões nesta zona, com particular incidência no caso das tensões paralelas às fibras (no funcionamento em *arco*) e das tensões perpendiculares às fibras (no funcionamento *em viga*). Em torno das chapas, a distribuição de tensões é complexa.

As figuras seguintes apresentam os resultados das simulações, relativas ao estado de tensões paralelas às fibras (Figura 5 e Figura 6), tensões perpendiculares às fibras (Figura 7 e Figura 8) e tensões tangenciais (Figura 9 e Figura 10), no modelo do elemento contínuo. Valores positivos (verdes e azuis) representam tração.

Como seria de esperar, o funcionamento do elemento *como viga* (apoio fixo/apoio móvel) é muito mais penalizador, com tensões significativamente mais elevadas, do que o funcionamento *em arco* (apoios fixos) em que o elemento curvo está essencialmente em compressão. De acordo com estas simulações, as tensões de tração perpendicular às fibras surgem com expressão significativa apenas no caso de funcionamento em viga.

As condições de segurança regulamentar apenas seriam cumpridas no caso de funcionamento dos elementos curvos *em arco* (dois apoios fixos), o que não é garantido com a pormenorização dos apoios observada *in situ*.

Foi também simulada a influência da forma de aplicação das cargas a meio vão. O acréscimo das tensões de tração perpendicular às fibras, devido à descida do ponto de aplicação de cargas na zona central do vão, relativamente à face superior dos *arcos* (considerando o elemento contínuo, com um apoio fixo e outro móvel), é exemplificado na Figura 11 e Figura 12 para os efeitos majorados das cargas permanentes e variáveis.

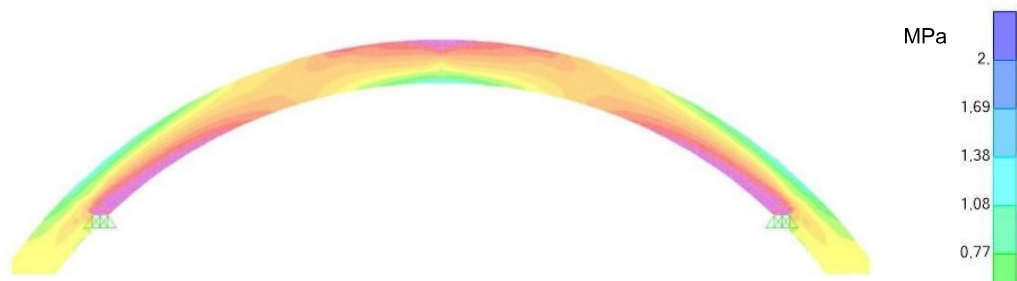


Figura 5. S11: Tensões paralelas às fibras – apoios fixos

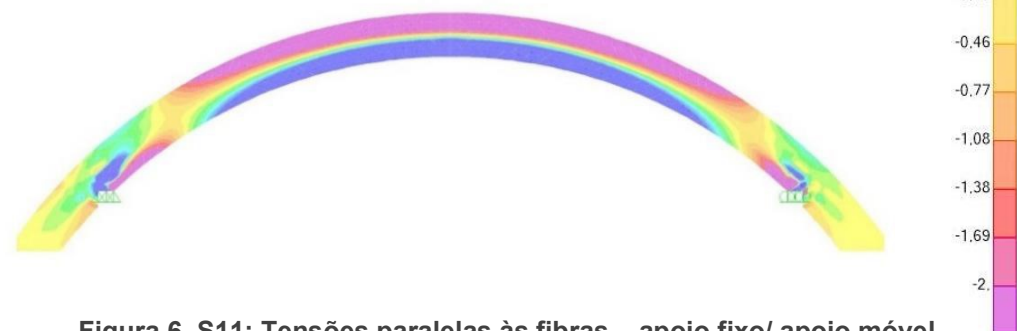


Figura 6. S11: Tensões paralelas às fibras – apoio fixo/ apoio móvel



Figura 7. S22: Tensões perpendiculares às fibras – apoios fixos

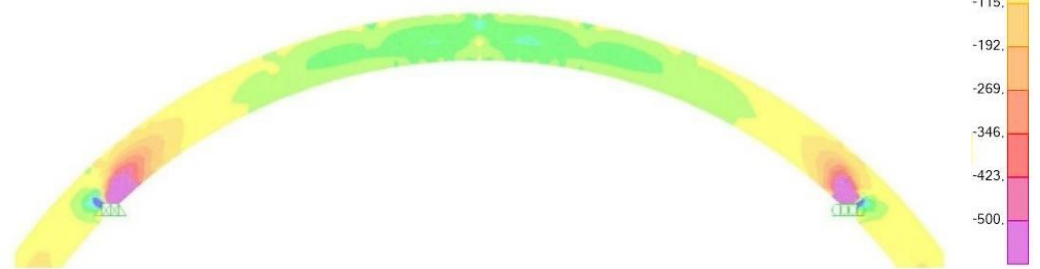


Figura 8. S22: Tensões perpendiculares às fibras – apoio fixo/ apoio móvel

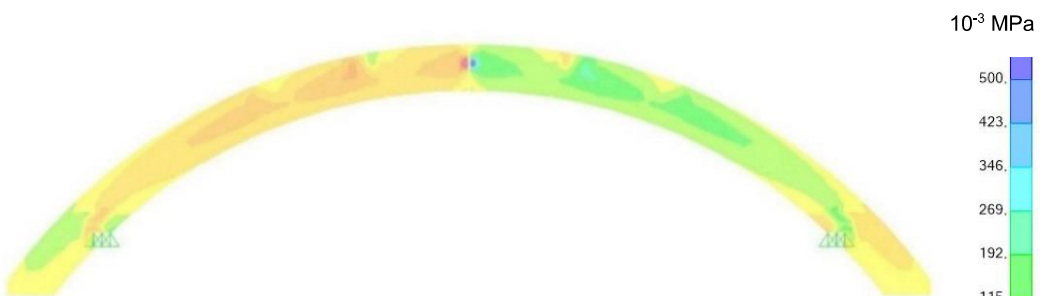


Figura 9. S12: Tensões tangenciais – apoios fixos

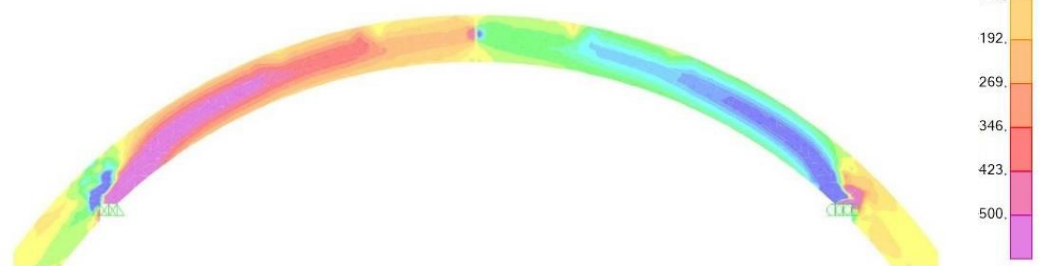


Figura 10. S12: Tensões tangenciais – apoio fixo/ apoio móvel

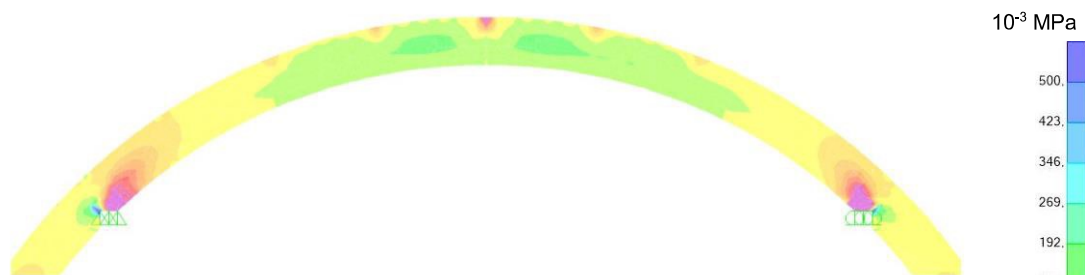


Figura 11. S22: Tensões perpendiculares às fibras – apoio fixo/ apoio móvel – elemento contínuo. Cargas aplicadas sobre o elemento

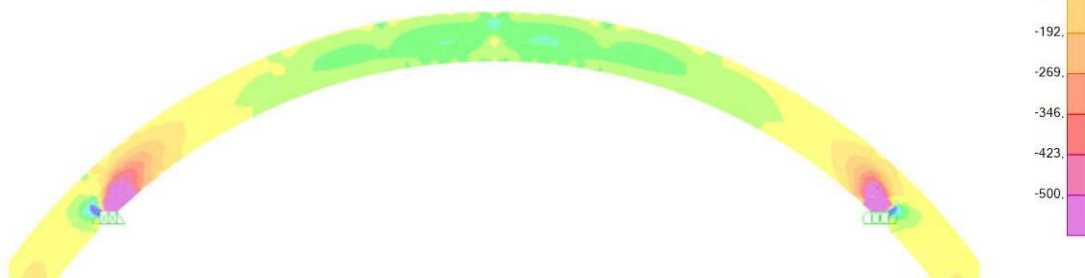


Figura 12. S22: Tensões perpendiculares às fibras – apoio fixo/ apoio móvel – elemento contínuo. Cargas suspensas das faces do elemento

Em conclusão, os resultados dos ensaios realizados no LNEC não identificaram deficiências de colagem, considerando-se que as fendas observadas nos elementos curvos terão origem sobretudo em aspetos de dimensionamento e de pormenorização das ligações, que permitem o desenvolvimento de tensões significativas de tração perpendicular às fibras, para as quais a resistência da madeira é muito baixa.

Acrescem os efeitos locais de concentração de tensões, nomeadamente associados ao impedimento da livre retração da madeira resultante da pormenorização da ligação a meio vão e às condições da aplicação das cargas na zona da cumeeira.

4. CASO DE ESTUDO 2

4.1 Descrição

A estrutura de cobertura 2 é constituída por vigas de inércia variável, de duas pendentes (Figura 13). As vigas têm secção transversal de 185 mm x (800 a 1700 mm), estando aplicadas em posição invertida (com a face reta para cima); apoiam-se nas paredes exteriores, a cotas distintas, por meio de chapas metálicas aparafusadas à madeira com 4 parafusos M16, por sua vez chumbadas à viga de betão armado de coroamento da parede.

A Memória Descritiva do projeto refere que as vigas são da classe de resistência GL 24h, produzidas com madeira de *Picea abies* L. e cola de fenol-resorcinol. É omissa em relação ao fabricante e ao processo de controlo de qualidade de fabrico e certificação implementados.

Sem aviso, menos de 8 anos após a construção, a metade inferior da viga destacou-se, por rotura progressiva ao longo das juntas de colagem entre lamelas, estilhaçando-se no chão.



Figura 13. Aspeto geral da estrutura de cobertura. Viga acidentada com escoramento e pormenor da zona de fratura ao longo de uma junta colada (cor branca)



Figura 14. Ligações nos apoios

4.2 Observação e caracterização experimental

A apreciação visual dos destroços espalhados pelo chão e a reconstituição da parte inferior da viga acidentada permitiu concluir que a rotura ocorreu essencialmente ao longo de uma junta colada sensivelmente a meia altura da secção de meio vão. Evidenciou também problemas graves de colagem, com manifesta falta de cola e/ou de molhagem das superfícies dessa e de muitas outras lamelas e *finger-joints* (Figura 15).

Foram observados em todas as vigas sinais de delaminação das juntas coladas, em alguns casos ao longo de vários metros, bem como muitos *finger-joints* deficientemente colados (as duas superfícies do entalhe parecem não estar em contacto e não há sinais de exsudação de cola). Em alguns pontos das vigas observou-se também uma concentração de *finger-joints* com estas deficiências nas imediações de uma mesma secção transversal.



Figura 15. Juntas de colagem com falta de cola e ligações (*finger-joints*) abertas

Os ensaios conduzidos em laboratório confirmaram haver deficiências de colagem das lamelas da parte da viga que se destacou. Com efeito, nenhuma das juntas coladas ensaiadas cumpria as exigências estabelecidas na EN 14080 [1], em termos de resistência à delaminação ou de resistência ao corte da junta colada, sendo particularmente críticas as percentagens de rotura coesiva da cola e de rotura adesiva entre a cola e a madeira, em muitos casos francamente acima do permitido pela norma.

As carotes posteriormente colhidas e ensaiadas ao corte pela junta colada conduziram igualmente a percentagens de rotura coesiva da cola ou adesiva entre a cola e a madeira em geral muito acima do permitido pela referida norma.

A identificação da cola usada entre lamelas foi feita no LNEC por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) sobre carotes retiradas de diversas vigas de madeira. Concluiu-se que em todas as vigas foi usada uma cola à base de poliacetato de vinilo. As colas de poliacetato de vinilo são normalmente destinadas a utilizações não estruturais. Refira-se ainda que a norma EN 14080 especifica um conjunto de famílias de colas aplicáveis ao fabrico de madeira lamelada colada estrutural (para garantir a adequada resistência e durabilidade), que não inclui poliacetato de vinilo.

Refira-se que a Memória Descritiva da estrutura referia o fabrico das vigas com uma cola de "resorcina-fenol", não havendo indícios de cola deste tipo nas amostras ensaiadas.

4.3 Modelo numérico

Desenvolveu-se um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos através do *software* comercial de cálculo automático de estruturas SAP2000 [5]. Utilizaram-se elementos de casca e realizou-se uma análise linear, assumindo um comportamento ortotrópico para o material. Considerou-se a geometria representada na Figura 16.

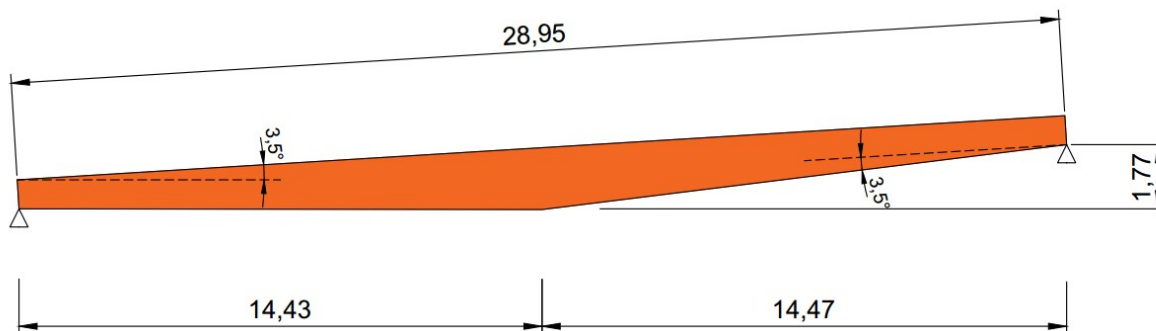


Figura 16. Geometria da viga (dimensões em m)

Face aos resultados obtidos no LNEC sobre o material colhido em obra, adotou-se uma massa volúmica média para a madeira aplicada de $\rho_{g,mean} = 460 \text{ kg/m}^3$, e para as propriedades elásticas do material os valores correspondentes à classe GL 24h (EN 14080 [1]).

Foram considerados dois modelos relativamente às condições de apoio:

- com apoios parcialmente encastrados – simulados por um conjunto de apoios em linha, no alinhamento correspondente aos parafusos que fixam a viga nos apoios, cada um desses pontos permitindo rotação e impedindo os deslocamentos.
- simplesmente apoiada – apoios rotulados, permitindo deslocamentos horizontais num apoio.

Comparou-se igualmente a distribuição de tensões para a situação real (viga invertida) e para a situação mais correntemente usada (viga com cumeeira voltada para cima).

O peso próprio (PP) foi considerado de forma automática pelo programa. As restantes ações correspondem ao assumido na Memória Descritiva, em conformidade com o (RSA, [7]).

- RCP = 46 kN (cargas pontuais);
- SOB = 55 kN (cargas pontuais);
- Vento = 115 kN (força distribuída através de cargas perpendiculares ao plano da face superior da viga (sucção), resultante de adotar um coeficiente de pressão igual a -1.

Foram tidas em conta as combinações de ações indicadas no Quadro 1.

Quadro 1. Combinações de ações consideradas

Combinação de ações		Classe de duração das ações	k_{mod}
C1	1,35 (PP+RCP)	Permanente	0,6
C2	1,35 (PP+RCP) + 1,5 (SOB)	Média duração	0,8
C3	1,35 (PP+RCP) + 1,5 (SOB) + 0,9 (vento)	Curta duração	0,9
C4	1,35 (PP+RCP) + 1,05 (SOB) + 1,5 (vento)		
C5	1,0 (PP+RPC) + 1,5 (vento)		

Foram adotados coeficientes de segurança relativamente às ações permanentes de 1,35 (efeito desfavorável) e de 1,0 (efeito favorável) dado que os pesos dos materiais são bem conhecidos. No restante seguiu-se o estabelecido no RSA.

4.4 Resultados e conclusões

Os resultados da modelação mostram que ocorrem tensões de tração perpendicular às fibras na zona do cume da viga, sob a ação do vento, e tensões tangenciais significativas na face inferior. Confirmam também um aumento da flecha e um agravamento das tensões atuantes na hipótese de viga simplesmente apoiada (Figura 17 e Figura 18). No entanto, mesmo nessa hipótese mais conservativa, são verificadas as condições de segurança estabelecidas em [2] relativamente ao dimensionamento da viga face ao estado limite último de rotura (assumindo que o material tivesse um comportamento adequado).

Os resultados obtidos apontam assim para deficiências de fabrico da viga colapsada, nomeadamente associadas à utilização de uma cola inadequada para colagem estrutural, como causa provável da rotura ocorrida. A inspeção levada a cabo e os resultados dos ensaios realizados sobre amostras das restantes vigas indicaram que essas deficiências afetavam de forma generalizada todas as vigas principais da estrutura de cobertura.

As Figura 19 a Figura 22 comparam, em termos de tensões perpendiculares e tangenciais às fibras da madeira, a viga real e o caso hipotético de uma viga igual aplicada com a face reta para baixo, para o modelo de ligações parcialmente encastradas, condições de apoio que melhor representam a situação real. Valores positivos (verdes e azuis) representam tração.

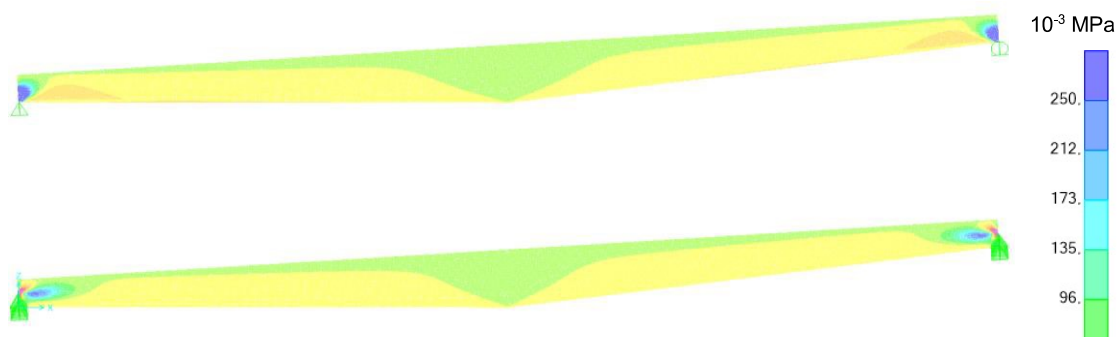


Figura 17. S22: Tensões perpendiculares às fibras – apoios rotulados (em cima) e parcialmente encastrados (em baixo) – Combinação C5

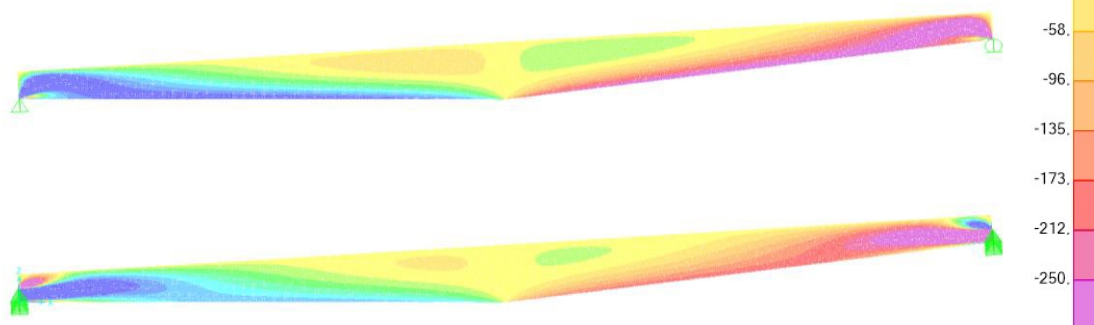


Figura 18. S12: Tensões tangenciais às fibras – apoios rotulados (em cima) e parcialmente encastrados (em baixo) – Combinação C5

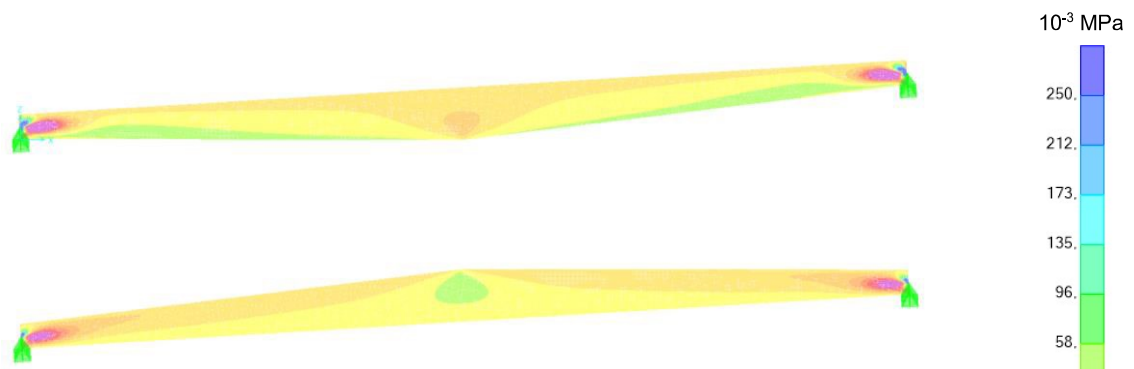


Figura 19. S22: Tensões perpendiculares às fibras – viga real (em cima) e viga invertida (em baixo) apoios parcialmente encastrados – Combinação C2

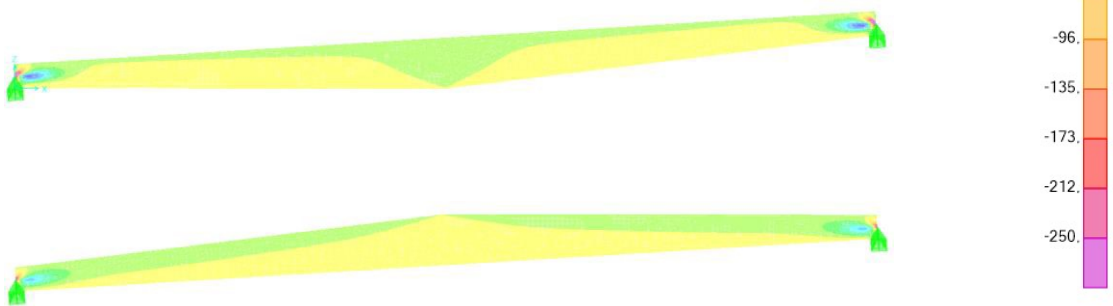


Figura 20. S22: Tensões perpendiculares às fibras – viga real (em cima) e viga invertida (em baixo) apoios parcialmente encastrados – Combinação C5

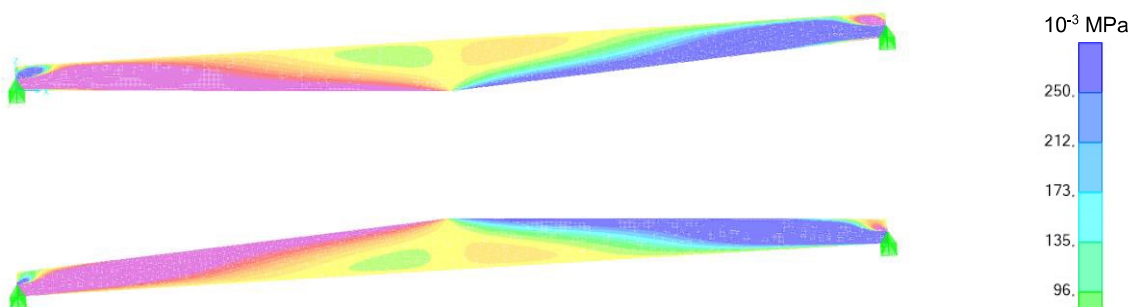


Figura 21. S12: Tensões tangenciais às fibras – viga real (em cima) e viga invertida (em baixo) apoios parcialmente encastrados – Combinação C2

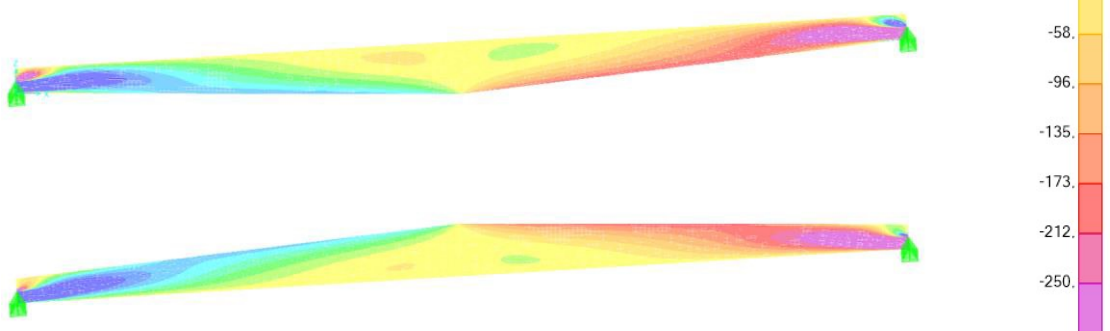


Figura 22. S12: Tensões tangenciais às fibras – viga real (em cima) e viga invertida (em baixo) apoios parcialmente encastrados – Combinação C5

Com base nas simulações realizadas, verifica-se que a adoção da geometria de viga invertida utilizada no caso em estudo (cumeeira voltada para baixo) implica um agravamento de flechas e esforços atuantes, nomeadamente o aumento de trações perpendiculares às fibras, para as combinações de ações regulamentares, em particular para a combinação que inclui a ação do vento. Além disso, esta opção, embora permitida pelo Eurocódigo 5, potencia que eventuais roturas ocorridas em juntas abaixo da linha entre apoios ocasionem o destacamento e colapso de material, o que ocorreu na prática face à excepcionalmente baixa resistência dos elementos, ao corte e à tração perpendicular às fibras, resultado da fraca resistência das juntas coladas.

5. NOTAS FINAIS

Os dois casos de estudo apresentados realçam a importância da consideração de tensões de tração perpendicular às fibras em vigas de madeira lamelada colada, curvas e/ou de inércia variável, que devem merecer cuidados especiais nas fases de projeto, de montagem e de exploração.

Embora este assunto seja já abordado na atual versão do Eurocódigo 5 [1], está prevista a inclusão, na futura versão dessa norma, de regras adicionais para elementos com geometria especial, nomeadamente elementos curvos e/ou de inércia variável, com entalhes ou furos, bem como para ligações; incluirá igualmente disposições específicas para o reforço estrutural face aos esforços de tração perpendicular às fibras. Refira-se que foi proposta a recomendação de reforçar, para os esforços de tração perpendicular às fibras, as vigas retas de pendente dupla e/ou curvas, de madeira lamelada colada de Resinosas, sempre que o valor de cálculo das tensões atuantes de tração perpendicular às fibras exceda 60% do valor de cálculo das tensões resistentes correspondentes, ou se a estrutura for sujeita a variações severas das condições ambientais.

REFERÊNCIAS

- [1] EN 14080:2013 – “Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements”. CEN, Bruxelas.
- [2] EN 1995 1 1:2004/AC:2006+A1:2008 – “Eurocode 5: Design of timber structures – part 1-1: General – Common rules and rules for buildings”. CEN, Bruxelas.
- [3] Gowda, S; Kortessmaa, M.; Ranta-Maunus, A. – “Duration of load effect on curved glulam beams”. *VTT Publications 334*, Espoo, 1998.
- [4] EN 338:2016 – “Structural Timber – Strength classes”. CEN, Bruxelas.
- [5] SAP2000 – “SAP2000 Ultimate 64-bit. Structural Analysis Program. Version 21.2.0, Build 1565”. *Computers and Structures, Inc.*, 2019
- [6] Blyberg, L. – “Modelling the effect of cracks in an inverted double-tapered glulam beam. Implementation of two fracture mechanics models”. Master's thesis in Applied Mathematics. Växjö University, Suécia. Report 08025.
- [7] Decreto – Lei nº235/83 – “Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes – RSA”. *Diário da República* de 31 de maio de 1983.