




Comportamento à flexão de vigas de madeira reforçadas com perfis de aço fixados com diferentes parafusos: análise experimental e computacional

Bending behavior of wooden beams reinforced with steel profiles: experimental and computational analysis

Hinoel Zamis Ehrenbring¹ , Marcelo Vidal², Rafael Hannich Aires¹, Roberto Christ², Simone Braatz¹, Diego Schneider¹, Bernardo Fonseca Tutikian¹ , Fernanda Pacheco¹ 

¹Universidade do Vale do Rio dos Sinos – itt Performance. Av. Unisinos, 950, 93022-750, São Leopoldo, RS, Brasil.

²Universidad de la Costa, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Calle 58 # 55, 66, Barranquilla, Colombia.

e-mail: hzamis@unisinos.br, marceloc.vidal@gmail.com, rafaelhaires@unisinos.br, rchrist@unisinos.br, sbraatz@edu.unisinos.br, diegosch@unisinos.br, bftutikian@unisinos.br

RESUMO

Este artigo verificou o comportamento estrutural à flexão de três configurações de vigas mistas de madeira e perfis de aço, por meio do método de homogeneização da seção mista, ensaios experimentais e simulação computacional. Foram analisadas viga de madeira sem reforço (V-SR), com perfis de chapa de aço dobrada fixada com parafuso tipo prisioneiro (V-PRI) e autoatarraxante (V-AUT). Foram realizados ensaios de flexão por 3 pontos, obtendo a força de ruptura e deslocamentos. Verificou-se que a forma ruptura das vigas foi similar em todas as configurações, ocorrendo na parte tracionada, sem apresentar flambagem lateral dos perfis de aço ou deformação plástica dos parafusos. Notou-se que a inserção dos perfis de aço ocasionou um aumento na resistência das vigas mistas, sendo de 100% nas vigas com perfis de chapa de aço dobrada fixada com parafuso tipo prisioneiro (V-PRI) e de 32% nas vigas com perfis de chapa de aço dobrada fixada com parafuso tipo autoatarraxante (V-AUT). As simulações pelo método dos elementos finitos apresentaram valores mais próximos ao comportamento na flexão das vigas V-SR e V-PRI no regime elástico (ELS). O método de homogeneização da seção mista mostrou-se mais próximo dos resultados experimentais nas vigas de madeira reforçadas (V-PRI e V-AUT).

Palavras-chave: vigas; estruturas mistas; simulação computacional; madeira; reforço metálico.

ABSTRACT

This paper verified the structural behavior of three configurations of composite beams of wood and steel profiles, analytically by the mixed section homogenization method (MHSM), by experimental tests and simulated by the finite element method (FEM). Unreinforced wooden beam (V-SR), with bent steel sheet profiles fixed with stud (V-PRI) and self-tapping (V-AUT) screws were analyzed. The flexural behavior was analyzed by 3 points of these elements, represented by the load and displacement. It was found that the beam failure form was the same in all configurations, occurring in the tensioned part, without lateral buckling of the steel profiles or plastic deformation of the screws. It was noted that the insertion of steel profiles caused an increase in the strength of the composite beams, being 100% in the V-PRI sample and 32% in the V-AUT. The FEM simulations showed values closer to the bending behavior of the V-SR and V-PRI beams in the elastic regime (ELS). The experimental results of the V-AUT beams were more compatible with the mixed section homogenization model.

Keywords: beams; mixed structures; computer simulation; wood; metallic reinforcement.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de madeira sofrem degradação de seus componentes ao longo do tempo, seja pelo efeito de agentes biológicos, pelas ações de carregamento ou até mesmo incêndio [1]. Com isto, nestas estruturas, é recorrente adotar o uso de técnicas de reparo ou reforço dos seus elementos, com o objetivo de repor a capacidade resistente inicial da estrutura ou de aumentar a sua eficiência portante, respectivamente [2].

Conforme CARNEIRO [3], as vigas de madeira têm potencial de desenvolverem manifestações patológicas próximas aos seus aparelhos de apoio, devido ao acúmulo de umidade proveniente da má ventilação nestes locais, principalmente. Vigas de madeira submetidas a maiores teores de umidade, conforme LINKOV [4], tendem a apresentar maiores deformações e redução no módulo de elasticidade. Nesses cenários, pode ser necessária a instalação de cantoneiras metálicas fixadas entre a viga de madeira e a parede com o uso de parafusos. Porém, para esse tipo de intervenção, em geral, é realizada a remoção da madeira deteriorada e instalada uma nova peça, fato que dificulta ou até mesmo inviabiliza o trabalho por se tratar de um local de difícil acesso [1]. Além das intervenções na estrutura, devem-se estancar os trechos de percolação da água para o interior da edificação [5].

Neste contexto, o uso de estruturas mistas mostra-se uma alternativa apropriada para aplicação em edificações antigas com objetivo de reduzir os custos e acelerar a execução das atividades. Com isso, ao associar dois materiais com propriedades mecânicas distintas, como a madeira e o aço, pode-se conservar a arquitetura do ambiente ou edificação, funcionalidade e segurança estrutural [6]. Segundo CARNEIRO [3], o aço é um material versátil devido às suas propriedades mecânicas e físicas, bem como a possibilidade de assumir inúmeros formatos geométricos. Então, perfis ou elementos em aço são muito empregados como reforços de estruturas em diversas situações [7].

No caso de reforço para elementos em madeira, é uma solução viável por se tratar de componentes de menor seção transversal, alta resistência mecânica e fácil transporte/manuseio. Também, na maioria dos casos, não requer a retirada da parte degradada da madeira. Os reparos ou reforços podem ser feitos com a fixação de chapas ou perfis metálicos nas faces laterais das vigas com o auxílio de fixadores. NOWAK *et al.* [2] citam seu uso em *retrofits*, reabilitações, diante de ações sísmicas, por exemplo. Todavia, ARRIAGA *et al.* [8] alertam sobre a segurança contra incêndio destas estruturas mistas, sendo necessário o uso de materiais de proteção, como tintas intumescentes ou retardantes de chamas.

Um dos desafios dos profissionais que realizam o dimensionamento à flexão de vigas em estruturas, segundo CASTRO e GUIMARÃES [9], é conciliar as solicitações que atuam ao longo do elemento, sendo elas: cisalhamento, tração, compressão, torção e flexão simples ou composta. Além das solicitações, o comportamento da peça também é um fator influente para seu dimensionamento, como deformações globais e locais representadas pela deflexão [1].

Conforme SOUZA [10], as ligações possuem um papel fundamental dentro do projeto de reforço com peças metálicas, pois são elas que promovem a conexão entre os diferentes elementos a serem montados com a função de transferir os esforços entre os dois materiais. Quando são adicionados perfis metálicos em elemento de madeira, normalmente, utilizam-se conectores de aço, como parafusos [3]. Tais processos tornam o dimensionamento das peças mais complexo, sendo necessário adotar modelos mais precisos, como as simulações computacionais.

Conforme ALVES FILHO [11], atualmente a simulação de estruturas por método de elementos finitos (MEF) ganha cada vez mais espaço no mercado, pois apresenta agilidade, precisão dos resultados e melhor compreensão do comportamento da estrutura. Outro fato que impulsiona o uso dos softwares de simulações é o dimensionamento de sistemas complexos, visto que pelos métodos analíticos torna o processo lento e impreciso. No entanto, é importante conhecer a compatibilidade entre elementos dimensionados pelos modelos em MEF e analíticos para com os resultados reais (experimentais).

HASSANIEH *et al.* [12] pontuam que o conhecimento das propriedades do aço e da madeira são de grande alcance. Porém, uma atenção importante deve ser dedicada ao tipo de conexão estabelecida entre os materiais e seu consequente comportamento mecânico. Com isso, esse trabalho visa contribuir ao comparar o comportamento à flexão de três modelos de vigas madeira, sendo duas mistas compostas com madeira e peças de aço, alterando os elementos de ligação entre as duas partes, e a última viga somente madeira, obtido por simulações em MEF e analíticas, bem como nos ensaios laboratoriais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Etapas do estudo

Inicialmente, definiu-se a madeira e o aço a serem utilizados nas vigas mistas, bem como as diferenciações dos parafusos para ligação das chapas metálicas a viga de madeira. Então, ensaiou-se três exemplares de cada tipo, avaliando o deslocamento, a capacidade portante e o comportamento estrutural à flexão do elemento. Ainda, analisou-se cada conjunto computacionalmente com o uso de simulações computacionais, visando obter um resultado compatível com os modelos analíticos e experimentais.

2.2. Materiais

A madeira escolhida para a utilização nas vigas mistas foi a Cedro (*Cedrus*). O aço utilizado no reforço das vigas foi o CST CIVIL 300. As características dos dois materiais são apresentadas na Tabela 1. Para a confirmação dos dados, realizou-se a caracterização mecânica dos perfis de aço através do ensaio de tração direta, segundo a ABNT NBR 6892-1 [13].

2.3. Características das amostras e confecção

As configurações adotadas foram a viga de madeira sem reforço (V-SR), viga de madeira com perfis de chapa de aço dobrada fixada com parafuso tipo prisioneiro (V-PRI) e autoatarraxante (V-AUT). Na Figura 1 são apresentados os detalhes de cada configuração.

As dimensões das vigas de madeira foram definidas seguindo a ABNT NBR 14807 [15], sendo ensaiadas conforme a ABNT NBR 15522 [16]. Os perfis de aço utilizados foram do tipo “L”, com o comprimento equivalente ao das vigas, abas desiguais de 25 × 60 mm e espessura de 2,65 mm. No dimensionamento dos perfis, considerou-se o estado-limite último (ELU), levando em consideração o fato de que os perfis são majoritariamente submetidos aos esforços de compressão e à pressão de contato dos parafusos. Após escolhido o perfil, verificou-se suas condições aos requisitos da ABNT NBR 8800 [17], referente ao dimensionamento de barras prismáticas submetidas às ações estáticas.

No primeiro modelo de viga foram utilizados, nos fixadores, parafusos do tipo passante bicromatizado da marca Belenus, com cabeça sextavada, rosca M5 com comprimento de 65 mm, seguindo as dimensões da ISO DIN 933/4017 [18]. Também, foram usadas arruelas do tipo lisas zincadas M5 – ISO 7089 [19] e porcas sextavadas zincadas M5 – ISO 4032 [20]. Já o segundo modelo é o parafuso do tipo autoatarraxante, com cabeça chata Phillips Ø4,8 × 35 mm, com uma proteção superficial zincada branca, seguindo a ISO 7050 [21]. A Figura 2 apresenta as faces laterais das vigas, a fim de indicar os pontos de fixação dos parafusos.

A instrumentação das amostras para o ensaio de tração na flexão é ilustrada na Figura 3, seguindo a ABNT NBR 15522 [16], com velocidade de carregamento de 10N/s até a ruptura. Para medir as deflexões das amostras, utilizaram-se quatro relógios comparadores posicionados de forma que dois medissem deslocamentos verticais na parte inferior da madeira, enquanto os outros dois relógios mediram os deslocamentos verticais no reforço metálico na parte superior. Já a deflexão foi mensurada no centro do vão teórico com auxílio do medidor de deslocamento vertical acoplado no atuador da máquina universal de ensaios.

Tabela 1: Especificações da madeira de Cedro e do aço CST CIVIL 300.

PROPRIEDADE	AÇO CST CIVIL 300	PROPRIEDADE	CEDRO [14]
f_y (MPa)	363	ρ_{ap} (kg/m ³)	530
f_u (MPa)	434	ρ_{bas} (kg/m ³)	440
ϵ (%)	26	f_{co} (MPa)	39,1
Redução de área (%)	66	E_{co} (GPa)	9,6

Legenda: f_y – tensão de escoamento; f_u – tensão de ruptura; ϵ – deformação específica; ρ_{ap} – densidade de massa aparente; ρ_{bas} – densidade de massa básica; f_{co} – resistência à compressão; E_{co} – módulo de elasticidade.

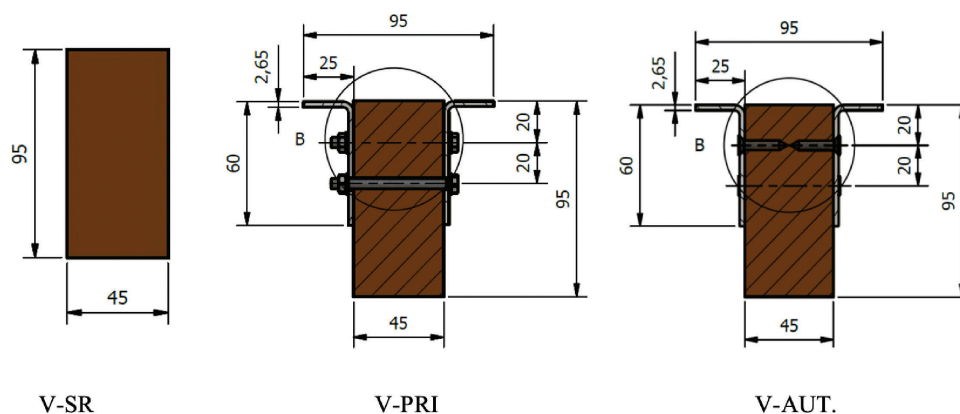


Figura 1: Configuração da seção transversal das amostras analisadas (dimensões em mm).

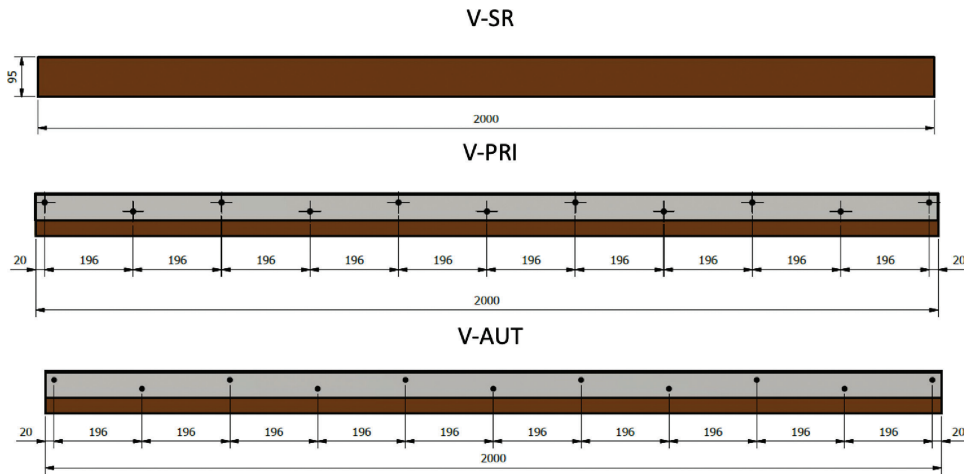


Figura 2: Configuração da face lateral das amostras analisadas (dimensões em mm).

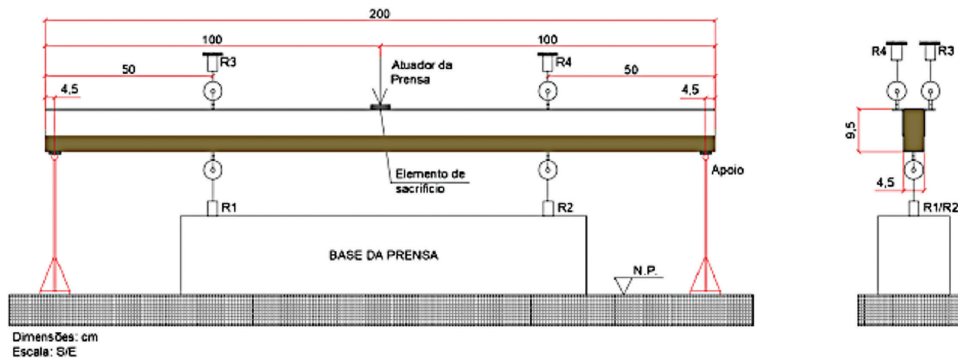


Figura 3: Diagrama da instrumentação das amostras adotada nos ensaios de flexão por 3 pontos.

2.4. Verificação analítica (MHSM)

Para a verificação analítica das vigas, seguiu-se um roteiro de cálculo constituído pelas etapas de homogeneização da seção da viga mista para uma nova seção somente em aço, avaliação do momento de inércia da nova seção pelo teorema de Steiner, cálculo dos valores de deflexões e cálculo das tensões de tração e compressão. Para as vigas mistas, considerou-se o método da seção homogeneizada, enquanto para as vigas sem reforço utilizou-se o módulo de elasticidade, o seu momento de inércia sem ser homogeneizado e o método tradicional para determinar as tensões.

2.5. Análise computacional

Na etapa de análise numérica, foi utilizado o módulo de elementos finitos do software de modelagem da Autodesk “Inventor Professional”. Com o objetivo de comparar os resultados obtidos nos ensaios, foram inseridas as características físicas e mecânicas e as dimensões dos elementos de forma a retratar as condições dos ensaios experimentais no software. Considerou-se restringida a movimentação dos eixos Y e Z para as amostras dos dois modelos de vigas reforçadas. A carga foi disposta concentrada no centro da viga com uma aplicação gradual a cada 1 kN, gerando os valores de deflexões e tensões distintas para serem comparados com os valores obtidos dos ensaios experimentais.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização dos materiais

3.1.1. Madeira

Na Tabela 2 encontram-se os resultados dos parâmetros físicos obtidos na caracterização da madeira empregada neste estudo. Também, foi calculada a diferença (Δ_{e-IPT}) entre as propriedades obtidas na caracterização e as apresentadas pelo IPT [14].

Tabela 2: Resultados da caracterização da madeira.

PROPRIEDADE	ESTUDO	Δ_{e-IPT}
ρ_{ap} (kg/m ³)	619	+17%
ρ_{bas} (kg/m ³)	518	+18%
f_{co} (MPa)	37,2	-5%
E_{co} (GPa)	3,7	-61%

Tabela 3: Resultados do ensaio experimental do aço.

PROPRIEDADE	ESTUDO	Δ_{e-CST}
f_y (MPa)	316	-13%
f_u (MPa)	457	+5%
E (GPa)	207	-1%

Verificou-se que as propriedades da madeira de Cedro apresentadas pelo IPT [14] e obtidas neste estudo foram semelhantes, com exceção do módulo de elasticidade, o qual apresentou diferença superior a 60%. De acordo com CARRASCO *et al.* [22], a temperatura no processo de secagem da madeira pode influenciar no seu módulo de elasticidade, principalmente, quando a temperatura ultrapassa 120 °C. Já a resistência à compressão, próxima a esta temperatura, também diminui. Verifica-se neste estudo que a resistência à compressão diminuiu em relação à referência, assim como o módulo de elasticidade, seguindo o que os autores apresentaram.

A variabilidade das propriedades destes materiais naturais é inerente ao seu processo de formação. Segundo SZUCS *et al.* [23] e ZENID [24], as variações aceitáveis entre os valores nominais especificados para as madeiras é de até 20%. Assim, pode-se considerar que a densidade e resistência à compressão do cedro utilizado estão dentro dos valores esperados pelos pesquisadores e especificados na literatura.

Importante salientar a necessidade de caracterizar os materiais a serem utilizados nos programas experimentais para que os valores reais sejam utilizados nas simulações por MEF e analítica, como foi realizado neste estudo. Estudos realizados por FORTI *et al.* [25] mostraram as diferenças e a importância de conhecer as propriedades dos materiais utilizados em simulações computacionais para que representem os valores mais próximos da realidade. Nota-se que, caso fossem adotadas as propriedades indicadas na literatura para executar as simulações, o comportamento teórico e experimental, por si só, já seria distinto. A variação de até 20% da resistência à compressão da madeira pode representar alterações relevantes no comportamento estrutural de elementos, conforme RIBEIRO [26]. Representar as vinculações e condições de contorno dos sistemas estruturais analisados em programas experimentais com simulações computacionais também gera imprecisão nos resultados. Porém, se entende que estas condições são mais complexas de determinar que as propriedades reais dos materiais.

3.1.2. Aço

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas do aço dos perfis utilizados. Também, foi calculada a diferença (Δ_{e-CST}) entre as propriedades obtidas e as fornecidas pelo fabricante.

Com base nos resultados obtidos na Tabela 3, nota-se que as propriedades do aço informadas pelo fabricante e as caracterizadas neste estudo obtiveram menor coeficiente de variação em relação às propriedades obtidas nas madeiras. Com isso, atendeu-se aos valores esperados para f_y e E, que influenciam diretamente no deslocamento do conjunto. Segundo CALLISTER e RETHWISCH [27], a variabilidade de materiais industrializados é consideravelmente menor que os materiais naturais, como a madeira. Também, o aço por ser um material homogêneo, apresenta propriedades mais estáveis em relação aos heterogêneos, como o concreto ou argilas.

3.2. Ensaio experimental: comportamento na flexão das vigas de madeira e mistas

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados do ensaio das vigas sem reforço e mistas.

Observou-se que as vigas V-SR apresentaram uma menor carga de ruptura, o que já era esperado devido à ausência de reforço. Nestes exemplares foram obtidos os menores valores de desvio padrão na carga de ruptura e deslocamento último, em relação às vigas mistas. A baixa variabilidade nos resultados em ELU das vigas V-SR ocorreu devido ao baixo número de intervenções no elemento analisado. Neste caso, como variável, considera-se apenas o elemento em madeira. Por outro lado, a variabilidade das vigas mistas foi maior, pelo fato

Tabela 4: Resultados no ensaio de tração na flexão das vigas mistas.

AMOSTRA	EXEMPLAR	CARGA ÚLTIMA (kN)		DESLOCAMENTO ÚLTIMO (mm)	
		VALOR UNITÁRIO	MÉDIA ± DP	VALOR UNITÁRIO	MÉDIA ± DP
V-SR	1	9,98	8,22	57,45	51,4
	2	7,22	±	47,89	±
	3	7,47	1,53	48,86	5,26
V-PRI	1	18,07	16,96	67,52	57,92
	2	14,82	±	44,53	±
	3	17,98	1,85	61,70	11,95
V-AUT	1	7,60	10,92	63,61	45,90
	2	10,92	±	35,41	±
	3	12,13	2,01	38,69	15,42

da inserção das vigas de aço e componentes de fixação influenciarem nos resultados. Ou seja, nas vigas mistas a variabilidade estava atrelada a 3 fatores (material, reforço em aço e componentes de fixação). De acordo com CANALLI [28], quanto maior for a heterogeneidade de um elemento ou material, maior é a probabilidade de apresentar coeficientes de variação elevados.

Observou-se que nas amostras V-PRI obtiveram as maiores cargas e deflexões dentre os tipos analisados. Isto reflete à ancoragem entre reforço e viga primária de madeira ser mais eficiente, tendo também em vista que o parafuso foi considerado passante. Os parafusos prisioneiros possibilitaram uma melhor transferência de esforços entre a viga em madeira e o reforço em aço. A eficiência de elementos de fixação passantes em peças de madeira submetidas à flexão já foi verificada por AUTENGRUBER *et al.* [29], obtendo valores de resistência consideráveis nas mesmas condições deste estudo. Nesta circunstância, o parafuso está submetido ao cisalhamento e à tração direta.

As amostras V-AUT obtiveram resultados intermediários entre os tipos de amostras, tendo acréscimo considerável na carga e deslocamento devido ao reforço. Porém, cabe analisar que este tipo de amostra apresentou maior desvio padrão nos dados de carga e deslocamento, e decréscimo de carga comparado às amostras V-PRI. Este fenômeno pode ser justificado pelo deslizamento dos parafusos autoatarraxantes da madeira, o que leva a considerar que este método de fixação seja menos eficaz para este tipo de sistema, que proporciona uma maior heterogeneidade ao elemento reforçado, tendo maior influência entre a madeira e o reforço. OUDJENE *et al.* [30] concordam com o apresentado, citando que os danos tendem a acontecer no elemento de ligação, sendo a parte frágil do sistema e responsável pelo seu rompimento. Pode-se considerar também que a execução das fixações tem grande influência nos resultados. Nesta circunstância, o parafuso está submetido ao cisalhamento e ao arrancamento. Uma consideração a ser feita nas ligações entre aço e madeira com parafusos autoatarraxantes é, além da qualidade do parafuso, analisar a densidade da madeira. Quanto mais densa for a madeira, maior é a sua contribuição na fixação dos componentes, pois eleva a resistência ao arrancamento dos parafusos, de acordo com KARAGÖZ İŞLEYEN e KESIK [31]. Ou seja, nos parafusos do tipo prisioneiro, a madeira pouco interfere no comportamento do sistema de ancoragem, por ser passante. Já nos parafusos autoatarraxantes, a madeira interfere diretamente na eficiência da ancoragem.

Diante do exposto sobre a aderência de parafusos autoatarraxantes em madeiras, as maiores variabilidades nos resultados das vigas V-AUT estão relacionadas à variabilidade da densidade da madeira e de sua resistência à compressão. YANG *et al.* [32] indicaram que estas duas características se relacionam ao potencial de aderência das peças de fixação.

Observando os dados como um todo, notou-se um desvio padrão elevado, mesmo em amostras idênticas, devido à limitação na escolha de uma madeira menos heterogênea e à fixação dos reforços nas amostras. Sendo assim, como evidenciado em sua grande parte nas amostras V-AUT, a execução do sistema tem grande impacto no seu desempenho estrutural. Por isso, na utilização de reforços metálicos deve-se dar preferência à utilização de parafusos passantes, por atingirem maiores cargas e terem menor variabilidade, pois a ligação independe das características da madeira. Na Figura 4 percebem-se as formas de ruptura das amostras analisadas.

Foi possível identificar que as amostras apresentaram um comportamento de ruptura similar, visto que o ponto de fratura ocorreu próximo à borda mais tracionada, como já apresentado por JELUŠIČ e KRAVANJA [33].

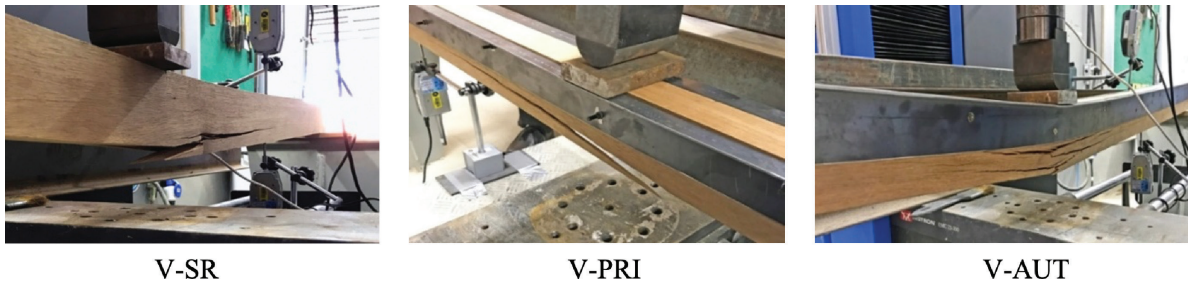


Figura 4: Formas de rupturas obtidas pelas amostras ensaiadas.

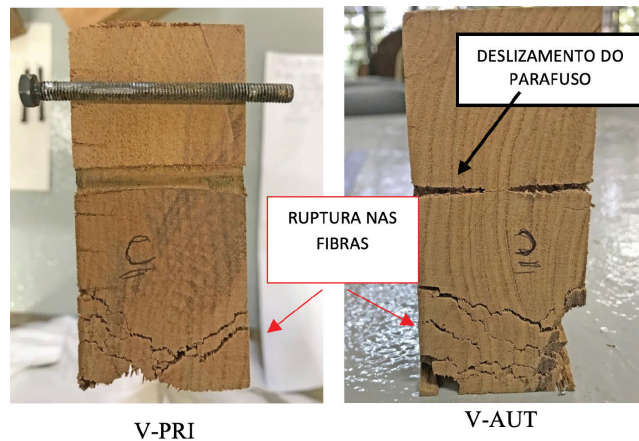


Figura 5: Estado de conservação das vigas mistas na seção parafusada.

A ruptura da peça de madeira pode ser explicada por atingir a capacidade resistente do material, ou seja, indicando falhas de fendilhamento e separação das fibras no seu sentido longitudinal. O resultado já era esperado, uma vez que este comportamento é característico deste material, segundo BOLINA *et al.* [1], além de ser uma das possibilidades de ruptura de elementos em madeira, com a delaminação em tiras.

Uma das hipóteses relacionadas ao aspecto e maior quantidade de fibras rompidas no conjunto de vigas V-AUT é o formato parafuso autoatarraxante e a trajetória que faz no interior da madeira. É possível notar na Figura 4 que o reforço da viga V-AUT apresentou plastificação, evidenciando que heterogeneidade foi maior entre a madeira e o reforço. Já para a viga V-PRI, o reforço não apresentou esta plastificação. Segundo LI *et al.* [34], os parafusos autoatarraxantes possuem dois vínculos de ancoragem, aquele dado pela sua rugosidade superficial e outro pelo confinamento (sobre pressão) das fibras das madeiras nos parafusos. Por ter formato cônico semelhante ao de pregos, aliado à instalação no sentido perpendicular às fibras da madeira, este elemento tende a separar transversalmente as fibras, criando tendências de ocorrências de fendilhamento na região, que, durante o carregamento, tende a aumentar cada vez mais, conforme ilustrado por GATO [5] e BOLINA *et al.* [1].

O afastamento das fibras da madeira na região de fixação dos parafusos, que tende a sofrer, principalmente com a compressão, provoca a alteração da linha neutra na seção transversal da peça, conforme explicam CZIBULA *et al.* [35]. Neste estudo, a linha neutra deslocou para a parte superior do elemento, diminuindo a seção comprimida e, conseqüentemente, aumentando a seção tracionada. Desta maneira, a área da seção transversal do conjunto submetido à tração foi maior, o que provocou a ruptura das fibras em várias alturas da viga V-AUT.

Esse comportamento não ocorreu no sistema V-PRI, pois foi realizado o processo de usinagem, furando a madeira no caminho da broca, e não forçando a abertura de fibras, o que acaba criando pontos preferenciais de fratura. Esta furação para a passagem do elemento também fragiliza a peça, porém não tanto quanto o embutimento dos parafusos autoatarraxantes, segundo OLIVEIRA [36]. A Figura 5 apresenta o aspecto da seção transversal das peças aparafusadas após o ensaio de flexão.

Analisando o aspecto da ruptura da seção transversal das vigas, pode-se observar comportamento típico de um elemento submetido à flexão, com a borda inferior tracionada e superior comprimida. Porém, é perceptível a diferença entre os mecanismos de fixação. O número de fibras rompidas foi maior nas vigas de V-AUT em relação às V-PRI, pelo fato da alteração da altura da linha neutra na seção transversal, como discutido por PACHECO *et al.* [37] e YOU *et al.* [38].

A fragilização da seção transversal ilustrada na Figura 5 indica a formação de fissuras em “V” no sistema V-PRI, que indica simetria e maior uniformidade de distribuição de esforços no elemento. Já quando observado o sistema V-AUT, as fissuras apresentaram formato inclinado. Este aspecto pode ter relação com dois principais elementos: uma possível concentrações de tensões causadas pela entrada de abertura de fibras do parafuso; e pelo escorregamento de um dos parafusos laterais, já que quando inseridos os autoatarraxantes, estes podem não apresentar a fixação desejada, por causa das microfissuras, conforme OLIVEIRA [36], TIAN *et al.* [39] e GOWHARI ANAKARI e FAKOOR [40]. Este escorregamento do parafuso autoatarraxante altera a distribuição dos esforços de tração na seção transversal.

3.3. Verificação analítica e simulação computacional: comportamento na flexão das vigas de madeira e mistas

3.3.1. Deflexões

A Tabela 5 apresenta os resultados encontrados no método analítico e nas simulações por MEF.

Foi possível observar diferença entre os resultados dois métodos. No caso do V-SR, o método analítico foi mais conservador, pois definiu o limite de ruptura em 5 kN, abaixo do MEF, que apresentou a estimativa em 10 kN. Observa-se que o MEF foi menos conservador, proporcionando o uso de fatores de segurança menores. De acordo com FORTI *et al.* [25], sistemas e elementos estruturais analisados pelos métodos mais avançados, como o MEF, tendem a apresentar resultados mais exatos e correspondentes à realidade do conjunto. Ainda, RIBEIRO [26] observou que a densidade da malha aplicada nas simulações em MEF impacta diretamente na qualidade do resultado, sendo que quanto maior o número de pontos na malha, mais próximo das condições reais estão os resultados. Por outro lado, os resultados das simulações em MEF são fidedignos dos dados incorporados no modelo virtual, como apresentaram AUTENGRUBER *et al.* [29]. Desta maneira, conhecer as propriedades dos materiais é de grande importância para que as simulações representem as condições esperadas.

Tabela 5: Resultados obtidos após verificações realizadas nas simulações.

CARGA (kN)	DESLOCAMENTO (mm)					
	V-SR		V-PRI		V-AUT	
	MHSM	MEF	MHSM	MEF	MHSM	MEF
1	10,20	4,29	2,47	2,53	2,47	1,15
2	20,39	8,48	4,95	4,73	4,95	2,21
3	30,59	12,67	7,42	6,71	7,42	3,28
4	40,79	16,86	9,89	8,59	9,89	4,35
5	50,98*	21,05	12,36	10,44	12,36	5,42
6	–	25,19	14,83	12,28	14,83	6,48
7	–	29,43	17,31	14,09	17,31	7,55
8	–	33,62	19,78	15,91	19,78	8,62
9	–	37,81	22,25	17,72	22,25	9,68
10	–	42,00*	24,72	19,53	24,72	10,74
11	–	–	27,20	21,34	27,20	11,81
12	–	–	29,67	23,15	29,67	12,87
13	–	–	32,14	24,95	32,14	13,94
14	–	–	34,61	26,74	34,61	15,01
15	–	–	37,09	28,55	37,09	16,07
16	–	–	39,56	30,35	39,56	17,09
17	–	–	42,03	32,14	42,03	18,20*
18	–	–	44,50	33,94	44,50	–
19	–	–	46,98	35,73	46,98	–
20	–	–	49,45*	37,54*	49,45*	–

Legenda: MHSM – método de homogeneização da seção mista; MEF – Método de elementos finitos; * – deslocamento na ruptura.

Destaca-se ainda que, inserindo as mesmas propriedades na verificação analítica e em MEF, as diferenças na carga de ruptura foram relevantes. SZUCS *et al.* [23] justificam que os modelos analíticos são mais imprecisos que as simulações em MEF, visto que buscam representar o comportamento mecânica dos conjuntos com base em análises estatísticas provenientes de ensaios experimentais. A extrapolação dos resultados experimentais obtidos para alimentar as fórmulas analíticas são condicionados por coeficientes de majoração e minoração, a fim de manter a segurança estrutural dos sistemas. Isto ocorreu nas vigas V-SR.

Considerando somente a análise V-PRI, é relevante constatar que os dois métodos apresentaram menores diferenças, uma vez que se incorpora o aço, que possui menores coeficientes de segurança e resultados mais confiáveis. Além disso, parafusos do tipo prisioneiro têm, neste caso, comportamento independente da aderência na madeira para realizar sua fixação. Deste modo o parafuso do tipo prisioneiro distribui de maneira mais eficiente, em toda sua área, as cargas atuantes na estrutura de madeira para o reforço metálico, podendo ser observado somente certo esmagamento na área de contato da madeira em contato do parafuso, após o ensaio.

AUTENGRUBER *et al.* [29] apresentam que os modelos analíticos perdem a precisão em sistemas compostos, como os indicados nesta pesquisa. Na maioria dos casos, a combinação de diferentes materiais e ligações nos conjuntos pode obter resultados menos precisos em relação às próprias verificações analíticas. Isto comprova-se nas vigas V-PRI e V-AUT. A diferença entre os modelos diminui não pela melhoria da precisão do método analítico, mas sim pelas dificuldades que a heterogeneidade provoca nestas verificações, forçando a extrapolação de valores.

Já na análise dos métodos considerando V-AUT, os valores apresentaram diferenças devido, em sua grande parte, pela incerteza gerada na resistência de aderência entre a madeira e o parafuso autoatarraxante. Nos modelos analíticos foi considerada a mesma resistência de aderência entre os parafusos prisioneiros e autoatarraxantes na madeira. Isso, por sua vez, é um dos grandes diferenciais em relação ao sistema de parafusos prisioneiros, pois nesse sistema a fixação do parafuso depende de dois fatores, o do parafuso em si, na resistência à tração nos filetes de rosca, e da madeira utilizada, conforme FENG *et al.* [41]. Como este sistema se utiliza da área de contato dos filetes da rosca dos parafusos com as fibras da madeira, o conjunto se torna muito suscetível a falhas. Falhas estas que podem ser provenientes desde problemas dos materiais empregados, como nós na madeira, até problemas de execução, como excesso de torque aplicado, causando rompimento das fibras de sustentação. Observando isso, pode-se observar o arrancamento do sistema de parafusos em conjuntos quando submetidos a esforços mais elevados. Neste caso, notou-se que, no MEF, os valores de tensão foram mais precisos, e a carga de ruptura foi menor que no método analítico, principalmente, pelos comportamentos dos parafusos.

3.3.2. Tensões de compressão e tração

A Tabela 6 apresenta os resultados de tensão de tração e compressão obtidos pelas vigas por meio do método analítico e simulação com MEF.

Percebeu-se que, novamente, os resultados obtidos no método analítico foram inferiores aos resultados gerados nas simulações em MEF. Assim como discutido para os resultados de deflexão, pode-se considerar as mesmas hipóteses para a determinação dos esforços (σ_c e σ_f). Devido ao conservadorismo dos modelos analíticos, dados principalmente pela consideração aos métodos analíticos, considera-se que a ruptura na compressão e tração serão sempre inferiores aos mesmos esforços indicados em MEF, independente da composição das vigas. De acordo com JELUŠIĆ e KRAVANJA [33], pode-se considerar que, quando utilizadas as propriedades verdadeiras dos materiais, as simulações em MEF aproximam-se mais dos métodos analíticos.

As maiores diferenças de esforços são na σ_f , uma vez que os exemplares foram analisados na flexão. É ainda mais perceptível a divergência entre valores de σ_f nas vigas mistas, ou seja, quando há a incorporação dos reforços. No método analítico há a simplificação do conjunto, desconsiderando a contribuição potencial das fixações, bem como o comportamento dos reforços em aço. Desta maneira, o valor da tensão de tração última foi menor que àqueles obtidos nas simulações em MEF. Destaca-se que nas simulações em MEF pode-se configurar o conjunto de forma equivalente a real, considerando a real contribuição de cada componente do conjunto, levando à uma tensão resistente superior.

Tabela 6: Tensões de compressão (σ_c) e tração (σ_f) obtidas pelas vigas por meio do método analítico e simulação com MEF.

ESFORÇO	V-SR		V-PRI		V-AUT	
	MHSM	MEF	MHSM	MEF	MHSM	MEF
σ_c (MPa)	31,6	48,0	16,2	17,0	12,3	15,4
σ_f (MPa)	31,6	32,0	28,0	41,6	27,0	54,6

Legenda: MHSM – método de homogeneização da seção mista; MEF – Método de elementos finitos.

3.4. Análise comparativa de comportamento na flexão das vigas de madeira e mistas: ensaios experimentais, verificação analítica e simulações em MEF

Na Figura 6 são apresentados, por meio de diagramas, os resultados obtidos nas simulações (MEF e AN) e ensaios experimentais das diferentes configurações de vigas. Os diagramas foram elaborados com três curvas, sendo que os valores dos ensaios experimentais são representados por uma curva média composta pelos valores dos 3 exemplares de cada tipo de viga.

Com base nos resultados apresentados na Figura 6, constatou-se que as vigas V-SR indicam a predominância de um comportamento linear-elástico, evidenciando uma característica inerente às peças em madeira submetidas à flexão, conforme discutido por LI *et al.* [34] e KARAGÖZ İŞLEYEN e KESIK [31]. Desta maneira, o aspecto da curva Carga vs. Deflexão é semelhante aos valores obtidos por simulação e analiticamente, que também indicam um comportamento linear. A inclinação da curva das vigas ensaiadas experimentalmente é mais compatível a formada pelos resultados determinados nas simulações em MEF, predominantemente, até

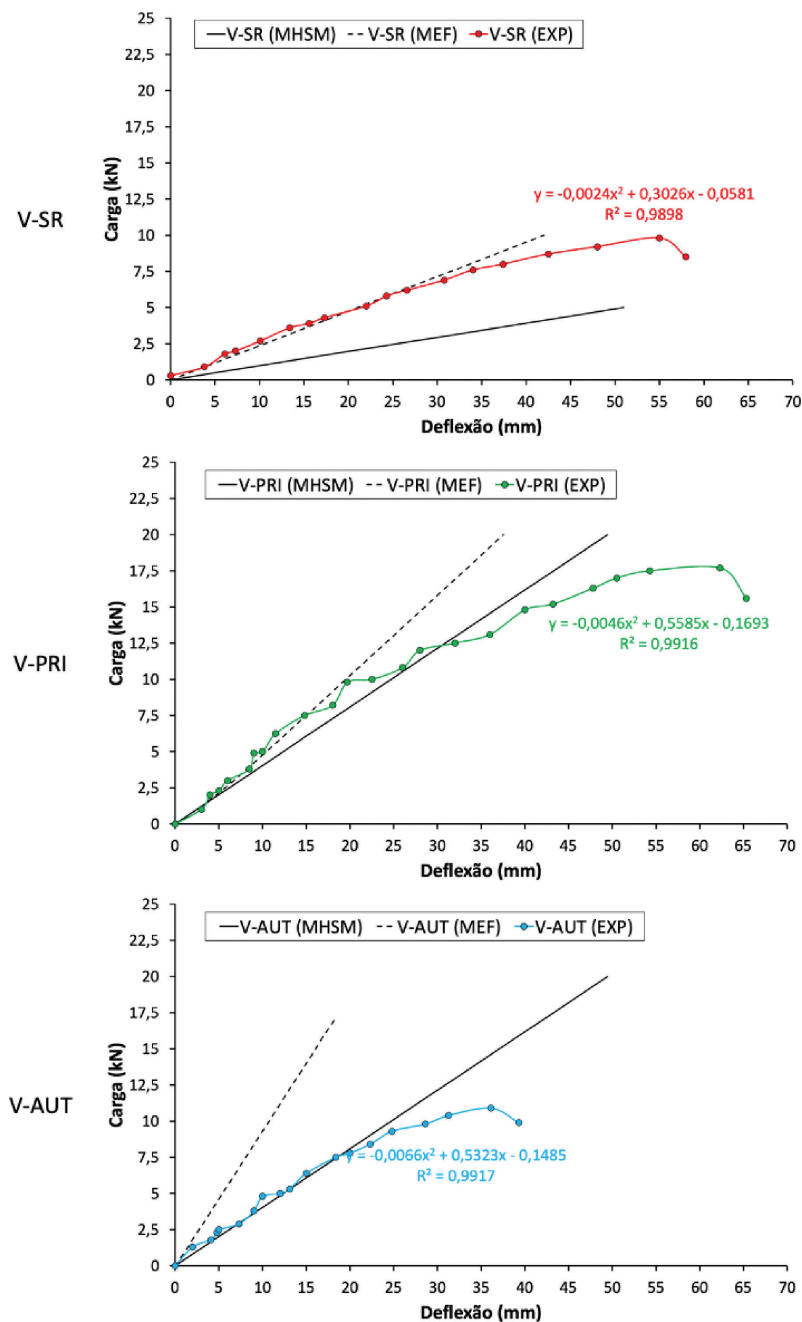


Figura 6: Diagramas de Carga vs. Deflexão das vigas analisadas analiticamente e em MEF, bem como ensaios experimentais.

a carga de 5 kN. Neste trecho, entende-se que os elementos estavam dentro do regime elástico, por ainda não apresentarem falhas visíveis, conforme FENG *et al.* [41]. Então, as simulações em MEF apresentaram-se confiáveis para determinação dos valores de carga e deflexão das vigas V-SR até o regime elástico. Assim como o comportamento na flexão é semelhante entre o experimento (EXP) e simulações em MEF, a carga de ruptura também foi muito próxima. A carga de ruptura prevista nas simulações em MEF foi de 10 kN e no ensaio experimental obteve-se 8,22 kN.

A diferença entre os resultados obtidos pelo método de homogeneização da seção (modelo analítico) com os resultados experimentais ressalta a imprecisão nos resultados. Um dos fatores que mais influenciou nas análises foi a aplicação dos fatores de segurança, o que provocou a diminuição da carga de ruptura prevista em 2 vezes em relação à carga real de ruptura. Ou seja, para estas vigas e nestas condições, o método de homogeneização da seção provocou um superdimensionamento.

Analisando os resultados das vigas V-PRI, observou-se que os resultados experimentais foram próximos dos obtidos nas simulações em MEF. Porém, destaca-se que esta similaridade ocorreu apenas no regime linear elástico, indicado pela inflexão da curva próximo de 10 kN. Nesta carga, foram registrados indícios de ruptura das fibras da madeira, passando o conjunto para o regime plástico. A partir desta carga o comportamento foi diferente do previsto em MEF, assim como foi diferente para o método de homogeneização da seção. Entende-se que esta alteração de comportamento dos valores entre os métodos (MHSM, MEF e EXP) foi observado por FORTI *et al.* [25], no regime plástico. Como justificativa, TIAN *et al.* [39] e DAPPER *et al.* [42] explicam que é impreciso prever o ponto exato de fratura no sistema heterogêneo, contendo uma série de interfaces entre componentes. A interação entre os componentes destes sistemas também gera imprecisão nas modelagens, gerando alterações consideráveis de comportamento.

Tanto para o método de homogeneização da seção quanto para as simulações em MEF era prevista a ruptura do conjunto em 20 kN. Nos ensaios experimentais, assim como nas vigas V-SR, a carga de ruptura obtida pelas vigas V-PRI foi próxima à prevista, atingindo valor de 17,0 kN. Portanto, nestes sistemas foi possível obter similaridade entre as cargas de ruptura determinadas pelo método de homogeneização da seção e simulações em MEF com os resultados experimentais. Todavia, o comportamento à flexão mostrou-se semelhante às simulações em MEF apenas no regime linear elástico.

Ao contrário dos demais conjuntos, as vigas V-AUT apresentaram comportamento na flexão equivalente àquele previsto pelo método de homogeneização da seção. Neste caso, a simplificação do modelo matemático proporcionou resultados mais próximos da realidade. Os valores obtidos nas simulações em MEF distanciaram-se dos obtidos nos ensaios experimentais devido à imprecisão das características e transferência de esforços nas zonas de interface entre os componentes do sistema misto. Desconhecer estas propriedades nos métodos em elementos finitos torna o resultado do modelo não representativo, como pode ser visto nas vigas V-AUT.

A carga de ruptura determinada nos ensaios experimentais da V-AUT foi de 10,92 kN, sendo inferior à prevista, que era de 17,5 kN. A diferença entre os valores é relacionada às alterações das distribuições dos esforços internos na seção da peça de madeira, devido às consequências nas fibras longitudinais ocasionadas pela inserção dos parafusos autoatarraxantes. Como discutido anteriormente, estes elementos afastam as fibras, forçando a ruptura precoce da madeira. Logo, esta diferença entre as tensões resistentes reais e calculadas foram nítidas nas vigas de V-AUT.

4. CONCLUSÕES

As conclusões obtidas neste estudo são:

- foi possível observar que a presença de reforço metálico aumentou a resistência mecânica da viga, pois nos ensaios experimentais que a viga mista fixa com parafusos do tipo prisioneiro obteve carga de ruptura 29% maior do que as vigas mistas fixas com parafusos autoatarraxantes e 106% maior do que as vigas sem a presença de reforço metálico;
- entre as análises de cálculo e de simulação computacional, pode-se citar que a maior diferença foi encontrada na viga sem reforço, considerando a tensão de compressão;
- em relação às três configurações testadas de vigas, foi possível traçar curvas com coeficientes de correlação acima de 0,90;
- o estudo analítico se mostrou eficaz para as cargas inferiores, porém próximo do estado limite de ruptura do material;
- o método de homogeneização da seção mista mostrou-se mais próximo dos resultados experimentais nas vigas de madeira reforçadas (V-PRI e V-AUT).

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] BOLINA, F.L., TUTIKIAN, B.F., HELENE, P.R.L., *Patologia de estruturas*, São Paulo, Oficina de Textos, 2019.
- [2] NOWAK, T., JASIENKO, J., KOTWICA, E., *et al.*, “Strength enhancement of timber beams using steel plates – review and experimental tests”, *Drewno*, v. 59, n. 196, pp. 75–80, 2016.
- [3] CARNEIRO, F.F.O.D., “*Reforço de vigas de madeira com elementos de aço em obras de reabilitação*”, Tese de M.Sc., Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.
- [4] LINKOV, V., “Effect of humidity on the wooden beams of the composite section”, *E3S Web of Conferences*, v. 110, pp. 01087, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/201911001087>.
- [5] GATO, A.C., *Madera: patologia y tratamiento*, 1 ed., Espanha, Bubok Publishing, 2007.
- [6] LOBÃO, M.S., DELLA LÚCIA, R.M., MOREIRA, M.S.S., *et al.*, “Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades”, *Revista Árvore*, v. 28, n. 6, pp. 889–894, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622004000600014>.
- [7] YANG, H., LIU, W., LU, W., *et al.*, “Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: experimental and theoretical evaluation”, *Construction & Building Materials*, v. 106, pp. 550–563, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.135>.
- [8] ARRIAGA, F., PERAZA, F., ESTEBAN, M., *et al.*, *Intervención em estruturas de madeira*, Espanha, AITIM, 2002.
- [9] CASTO, V. G., GUIMARÃES, P. P., *Deterioração e preservação da madeira*, 1 ed., Mossoró, EdUFERSA, 2018.
- [10] SOUZA, A.S.C., *Ligações em estruturas de aço*, 1 ed., São Carlos, EdUFSCar, 2015.
- [11] ALVES FILHO, A., *Elementos finitos: a base da tecnologia CAE*, vol. 6, Rio de Janeiro, Saraiva Educação, 2018.
- [12] HASSANIEH, A., VALIPOUR, H.R., BRADFORD, M.A., “Load-slip behaviour of steel-cross laminated timber (CLT) composite connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 122, pp. 110–121, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.008>.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de tração parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [14] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, *Fichas de características das madeiras brasileiras*, 2 ed., São Paulo, IPT, 1989.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 14087: Peças de madeira serrada*, Rio de Janeiro, ABNT, 2002.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 15522: Laje pré-fabricada – Avaliação do desempenho de vigotas e pré-lajes sob carga de trabalho*, Rio de Janeiro, ABNT, 2007.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*, Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
- [18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *ISO 4017: Fasteners – Hexagon head screws – Product grades A and B*, Genebra, ISO, 2014.
- [19] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *ISO 7089: Plain washers – Normal series – Product grade A*, Genebra, ISO, 2000.
- [20] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *ISO 4032: Hexagon regular nuts (style 1) – Product grades A and B*, Genebra, ISO, 2012.
- [21] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *ISO 7050: Cross-recessed countersunk (flat) head tapping screws*, Genebra, ISO, 2011.
- [22] CARRASCO, E.V.M., OLIVEIRA, A.L.C., MANTILLA, J.N.R., “Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucaliptos”, *Ciência Florestal*, v. 26, n. 2, pp. 389–400, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509822740>.
- [23] SZUCS, C.A., TEREZO, R.F., VALLE, A., *et al.*, *Estruturas de madeira*, Florianópolis, UFSC, 2015.
- [24] ZENID, J.G., *Madeira na construção civil*, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2011.
- [25] FORTI, N.C.S., FORTI, T.L.D., JACINTHO, A.E.P.G.A., *et al.*, “Análise de vigas mistas de concreto e madeira pelo método dos elementos finitos”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 8, n. 4, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000400006>.

- [26] RIBEIRO, P.G., “Utilização de técnicas não destrutivas para caracterização de madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis*”, Tese de M.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- [27] CALLISTER, W.D., RETHWISCH, D.G., *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*, 9 ed., São Paulo, LTC, 2016.
- [28] CANALLI, I., “Estudo do comportamento de estrutura mista de concreto e perfil pultrudado de PRFV sob flexão”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- [29] AUTENGRUBER, M., LUKACEVIC, M., GRÖSTLINGER, C., *et al.*, “Numerical assessment of wood moisture content-based assignments to service classes in EC 5 and a prediction concept for moisture-induced stresses solely using relative humidity data”, *Engineering Structures*, v. 245, n. 15, pp. 1128–1149, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112849>.
- [30] OUDJENE, M., TRAN, V.D., MEGHLAT, E., *et al.*, *Numerical Models for self-tapping screws as reinforcement of timber structures and joints*, In: *Word Conference on Timber Engineering – WCTE*, Vienna, Austria, 2016.
- [31] KARAGÖZ İŞLEYEN, Ü., KESIK, H.I., “Experimental and numerical analysis of compression and bending strength of old wood reinforced with CFRP strips”, *Structures*, v. 33, pp. 259–271, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.070>.
- [32] YANG, Y., LIU, J., XIONG, G., “Flexural behavior of wood beams strengthened with HFRP”, *Construction & Building Materials*, v. 43, pp. 118-124, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.029>.
- [33] JELUŠIČ, P., KRAVANJA, S., “Flexural analysis of laminated solid wood beams with different shear connections”, *Construction & Building Materials*, v. 174, pp. 456–465, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.102>.
- [34] LI, C., WANG, X., RAN, L., *et al.*, “PtoMYB92 is a transcriptional activator of the lignin biosynthetic pathway during secondary cell wall formation in *Populus tomentosa*”, *Plant & Cell Physiology*, v. 56, n. 12, pp. 2436-2446, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1093/pcp/pcv157>. PubMed PMID: 26508520.
- [35] CZIBULA, C., SEIDLHOFER, T., GANSER, C., *et al.*, “Longitudinal and transverse low frequency viscoelastic characterization of wood pulp fibers at different relative humidity”, *Materialia*, v. 16, pp. 101094, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101094>.
- [36] OLIVEIRA, M.A.M.E., “Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira”, Tese de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- [37] PACHECO, F., SOUZA, R.P., CHRIST, R., *et al.*, “Determination of volume and distribution of pores of concretes according to different exposure classes through 3D microtomography and mercury intrusion porosimetry”, *Structural Concrete*, v. 19, n. 5, pp. 1419–1427, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201800075>.
- [38] YOU, R., ZHU, N., DENG, X., *et al.*, “Variation in wood physical properties and effects of climate for different geographic sources of Chinese fir in subtropical area of China”, *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, pp. 4664, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-83500-w>. PubMed PMID: 33633125.
- [39] TIAN, Q., WANG, X., LI, C., *et al.*, “Functional characterization of the poplar R2R3-MYB transcription factor PtoMYB216 involved in the regulation of lignin biosynthesis during wood formation”, *PLoS One*, v. 8, n. 10, pp. e76369, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0076369>. PubMed PMID: 24204619.
- [40] GOWHARI ANAKARI, A.R., FAKOOR, M., “General mixed mode I/II fracture criterion for wood considering T-stress effects”, *Materials & Design*, v. 31, n. 9, pp. 4461–4469, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.055>.
- [41] FENG, X., XIAO, H., CHEN, B., “Experimental study on splitting strength of sawn lumber loaded perpendicular to grain by bolted steel-wood-steel connections”, *Journal of Building Engineering*, v. 44, pp. 44, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102554>.
- [42] DAPPER, P., EHRENDRING, H., PACHECO, F., *et al.*, “Ballistic impact resistance of UHPC plates made with hybrid fibers and low binder content”, *Sustainability*, v. 13, n. 23, pp. 13410, 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/su132313410>.