

SUBMETIDO 15/09/2021

APROVADO 03/11/2021

PUBLICADO ON-LINE 23/12/2021

PUBLICADO 10/07/2023

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6362>


ARTIGO ORIGINAL

Estruturas mistas madeira-concreto: o emprego da metodologia do Eurocode 5 no âmbito nacional

 Andréa de Souza Almeida ^[1]

 Tamiris Luiza Soares Lanini ^[2]

 Felipe Nascimento Arroyo ^{[3]*}

 Francisco Antonio
Rocco Lahr ^[4]

 André Luis Christoforo ^[5]

[1] andreadsa.engcivil@gmail.com

[4] frocco@sc.usp.br

Universidade de São Paulo (USP), Brasil

[2] tamirisluiza@hotmail.com

[3] lpe.arroyo@gmail.com

[5] christoforoal@yahoo.com.br

Universidade Federal de São Carlos
(UFSCar), Brasil

RESUMO: Estruturas mistas de madeira-concreto unem as melhores qualidades da madeira e do concreto, resultando em estruturas mais leves, rígidas e resistentes. São utilizadas na restauração de pisos e pontes de madeira, bem como na construção destas, em que se percebe um aumento da utilização desse sistema estrutural. Todavia, ainda são poucas as informações referentes às estruturas mistas em madeira-concreto na literatura, e o seu dimensionamento é abordado apenas pela normativa europeia Eurocode 5 (CEN, 2004). Nesse contexto, este trabalho apresenta as principais considerações a respeito do dimensionamento desse sistema estrutural e as principais divergências no emprego de tal técnica, essencialmente no Brasil, considerando a normativa brasileira em estruturas em madeira, para um eventual acréscimo sobre estruturas em madeira-concreto na ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997). Ao final, é possível concluir que alguns ensaios padrões precisam ser normalizados para a implementação do dimensionamento dessa estrutura mista na norma brasileira, como por exemplo o ensaio do módulo de deslizamento do conector.

Palavras-chave: conector; dimensionamento de elementos mistos; NBR 7190.

Timber-concrete composite structures: the use of the Eurocode 5 methodology at the national level

ABSTRACT: *Timber-concrete composite structures combine the best qualities of wood and concrete, resulting in lighter, more rigid and strength structures. They are used in the restoration of wooden floors and bridges, as well as in the construction of those bridges, where we can see an increase in the use of this structural system. However, there is still little information on composite timber-concrete structures in the literature, and their dimensioning is addressed only by the European standard Eurocode 5 (CEN, 2004). In this context, this paper presents the main considerations regarding the design of this structural*

*Autor para correspondência.

system and the main differences in the use of this technique, mainly in Brazil, considering the Brazilian standard of wood structures, for an eventual increase on composite timber-concrete structures in the ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997). In the end, it is possible to conclude that some standard tests need to be standardized to implement the design of this mixed structure in the Brazilian standard, such as the test of the connector's slip module.

Keywords: connector; dimensioning of mixed elements; NBR 7190.

1 Introdução

Em meio aos desafios impostos ao setor da construção civil, tem-se o emprego de soluções estruturais potenciais que promovam a racionalização dos materiais, alternativas aos materiais tradicionais aplicados em grande escala (AQUINO *et al.*, 2021). A associação da madeira ao concreto, seja em elemento de viga ou em tabuleiro, promove uma solução estrutural denominada estrutura mista em madeira-concreto, internacionalmente conhecida como TCC (*timber-concrete composite*) (YEOH *et al.*, 2011).

Ainda que pouco difundida, essa técnica foi desenvolvida devido à escassez do aço após as Guerras Mundiais I e II. Em 1922, um sistema formado por vigas em madeira, lajes em concreto e pregos e cintas de aço como conectores foi patenteado por Paul Müller. Então, em 1939, Otto Schaub apresentou perfis de aço em Z e I como sistema de conexão na interface madeira-concreto na Suíça. O marco de aplicação inicial em estruturas mistas madeira-concreto se deu em pisos de edifícios históricos europeus, como em Leipzig, na Alemanha (FRAGIACOMO; CECCOTTI, 2006).

Em um contexto mais recente, considerando-se os últimos 50 anos, tem-se o aumento do emprego de estruturas mistas em madeira-concreto na construção de pontes em países como Austrália, Áustria, Estados Unidos, Finlândia, Nova Zelândia e Suíça. Como exemplo, tem-se a ponte mista (madeira-concreto) Vihantalsami, ilustrada na Figura 1, construída em 1999 na Finlândia, com extensão de 168 metros (YEOH *et al.*, 2011).

Figura 1 ►

Foto da ponte Vihantalsami, na Finlândia.

Fonte: adaptado de Yeoh *et al.* (2011)



Ainda, a aplicação desse sistema estrutural abrange também a reforma de pisos de madeira existentes e, portanto, é uma técnica importante quanto à restauração de

elementos históricos. Assim sendo, percebe-se a viabilidade de emprego e ascensão no mercado desse sistema estrutural (YEOH *et al.*, 2011).

Nesse contexto e considerando o cenário nacional, a maioria das pontes em madeira no Brasil não são projetadas adequadamente. A construção é feita a partir da experiência profissional de técnicos e construtores especializados em madeiras. Por sua vez, tal fato implica em estruturas não racionalizadas, devido ao mau aproveitamento do material, inseguras e de baixa durabilidade. Como resultado, tem-se o estado atual de degradação das pontes em madeira, erroneamente associadas a um quadro negativo do uso desse material em soluções estruturais (PIGOZZO *et al.*, 2018).

Desse modo, há a urgente necessidade de recuperação de tais pontes, bem como da difusão do emprego dos avanços tecnológicos na construção de novas estruturas em madeira. Assim, desenvolveu-se no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM – EESC/USP) um projeto de pesquisa intitulado “Programa Emergencial das Pontes de Madeira para o Estado de São Paulo”, objetivando a análise e aprimoramento de novas tecnologias para construção em pontes de madeira. Uma das principais soluções propostas pelo projeto é o emprego de estruturas mistas em madeira-concreto (LAMEM, 202?).

Todavia, comparada aos demais sistemas estruturais, ainda são poucas as informações referentes às estruturas mistas em madeira-concreto na literatura (FERNÁNDEZ-CABO; FERNÁNDEZ-LAVANDERA; ÁVILA-JALVO, 2008; YANG *et al.*, 2021; ZHANG; ZHANG; CHUI, 2021). Outro fator a se considerar é que o dimensionamento de estruturas mistas em madeira-concreto não é abordado pela maioria das normativas existentes. A exceção é dada pelo Eurocode 5 (CEN, 2004), Parte 2, que aborda o tema quanto a pontes em madeira. Ainda, a norma europeia apresenta equações para determinação do módulo de deslizamento para conectores verticais, mas nada se discute quanto a conectores dispostos de forma inclinada.

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997) – “Projeto de estruturas de madeira” – nada apresenta em relação ao dimensionamento de elementos mistos em madeira-concreto. Portanto, os estudos realizados em âmbito nacional se baseiam em normas internacionais. Tal fato pode ser dito como incoerente, uma vez que a norma brasileira apresenta diversas considerações distintas das internacionais no que tange ao dimensionamento de estruturas em madeira. Tais diferenças devem ser consideradas quando da aplicação do dimensionamento de elementos mistos madeira-concreto com base no Eurocode 5 (CEN, 2004).

Assim sendo, este estudo tem como objetivo apresentar as principais considerações a respeito do dimensionamento de estruturas mistas em madeira-concreto, apresentado pelo Eurocode 5 (CEN, 2004), bem como discorrer sobre as principais divergências no emprego de tal técnica, essencialmente no Brasil, considerando a normativa brasileira em estruturas em madeira. O levantamento literário em questão é de extrema importância para um eventual acréscimo sobre estruturas em madeira-concreto na norma brasileira, como existente nos anexos da normativa ABNT NBR 8800 (ABNT, 2008) – “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios” – para elementos mistos em aço-concreto.

A seguir, será apresentada a metodologia proposta para alcançar os objetivos principais, além dos resultados, discussões e conclusões obtidas. Vale destacar que o Eurocode 5 (CEN, 2004) é a principal norma para estruturas mistas de madeira-concreto e que, por isso, foi utilizada para comparar com a normativa brasileira. Através das equações presentes em ambas as normativas, será possível concluir a pesquisa proposta e evidenciar as principais divergências entre elas.

2 Método da pesquisa

O dimensionamento de estruturas mistas em madeira-concreto não é abordado pela maioria das normativas existentes. A exceção é dada pelo Eurocode 5 (CEN, 2004), Parte 2, que aborda o tema quanto a pontes em madeira. Segundo o documento normativo, o comportamento das estruturas mistas em madeira-concreto e seu dimensionamento estão relacionados à ação composta parcial resultante da flexibilidade da conexão de cisalhamento, além das propriedades dependentes do tempo dos materiais componentes. Evidencia-se no presente estudo o sistema de conexão entre os materiais.

Geralmente, o conector de cisalhamento entre materiais não é totalmente rígido, e, portanto, a hipótese de que seções planas, após deformações, permanecem planas não é válida. Há um deslize entre a fibra inferior de concreto e a fibra superior da madeira. Para explicar tal fenômeno, têm-se duas abordagens: o método linear-elástico, analisado por Mohler (1956) e Ceccotti (1995), e o método elastoplástico, considerado por Frangi e Fontana (2003).

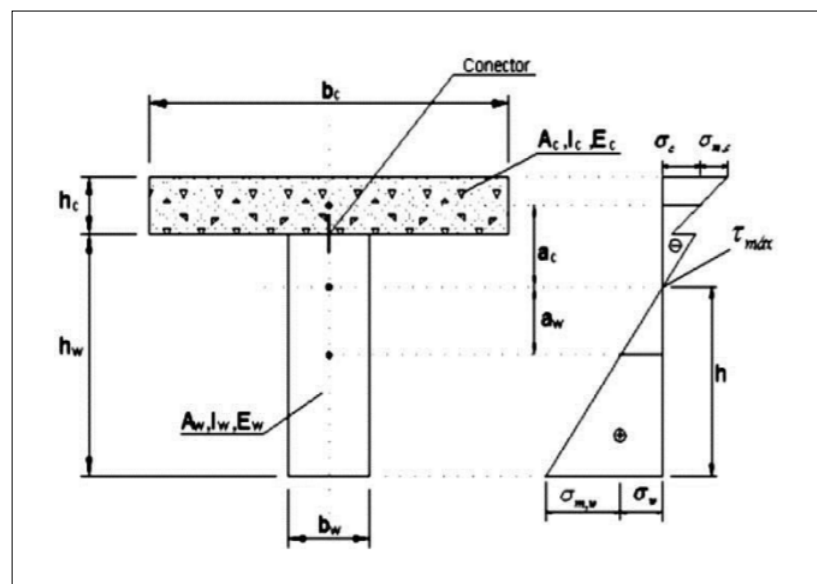
O método linear-elástico considera que os materiais constituintes (madeira, concreto e conectores de aço) permanecem no regime elástico até a falha da madeira. Tal situação é apropriada para o emprego de conectores rígidos, como entalhes na medida preenchidos por concreto ou conectados por adesivos, por exemplo. A solução aproximada, abordada pelo Eurocode 5 (CEN, 2004), derivada de Mohler (1956) e recomendada por Ceccotti (1995), é denominada Método Gama.

O método considera o tabuleiro misto, como uma viga equivalente de seção transversal T, composta por uma laje em concreto armado junto a uma viga de madeira. A conexão entre elementos é feita através de conectores metálicos, como exhibe a Figura 2.

Figura 2 ►

Seção transversal e tensões da viga equivalente.

Fonte: adaptado de Molina, Silva e Vasconcelos (2015)



Considerando-se tabuleiros mistos em madeira-concreto, a largura da mesa da viga (b_c) é dada como a distância entre eixos das vigas. O método gama estabelece que, com base no módulo de deslizamento do conector empregado, define-se o fator de redução de inércia do conjunto. Para combinações acidentais, o fator de redução a ser adotado para madeira equivale a um ($\gamma_w = 1,0$).

Para o concreto, o fator de redução (γ_c) é dado pela Equação 1. Vale ressaltar que as equações utilizadas no dimensionamento foram extraídas da norma inglesa para estrutura de aço-concreto BS 5400 (BSI, 2005) – “*Steel, concrete and composite bridges*”.

$$\gamma_c = \left[1 + \frac{\pi^2 \times E_c \times A_c \times s}{K \times L^2} \right]^{-1} \quad (1)$$

na qual: E_c é o módulo de elasticidade do concreto; A_c é a área da seção transversal de concreto; s é o espaçamento entre conectores; K é o módulo de deslizamento do conector empregado; e L é o vão livre considerado.

Ressalta-se que o módulo de deslizamento do conector (K) é um fator intrinsecamente relacionado ao seu comportamento e é obtido através do ensaio de cisalhamento direto em corpos de prova. Para conectores verticais, o Eurocode 5 (CEN, 2004) define o valor do módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}) em função da densidade média do conjunto (ρ_m) – ou seja, madeira e concreto – e do diâmetro do conector empregado (d), como exibe a Equação 2.

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \times d}{23} \quad (2)$$

A densidade média do conjunto é dada pela Equação 3.

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,c} + \rho_{m,w}} \quad (3)$$

em que $\rho_{m,c}$ é a densidade média do concreto e $\rho_{m,w}$ é a densidade média da madeira empregada. Nada é abordado em caso de conectores tipo “inclinado”.

A normativa apresenta as equações para determinação das distâncias dos centros de gravidade das seções transversais dos elementos de madeira (α_w) e concreto (α_c), dadas pelas Equações 4 e 5.

$$\alpha_w = \frac{\gamma_c \times E_c \times A_c \times (h_c + h_w)}{2 \cdot (\gamma_c \times E_c \times A_c + \gamma_w \times E_w \times A_w)} \quad (4)$$

$$\alpha_c = \left[\frac{h_c + h_w}{2} \right] - \alpha_w \quad (5)$$

em que: α_w é a distância do centro de gravidade do elemento em madeira até a linha neutra da peça; α_c é a distância do centro de gravidade do elemento em concreto até a linha neutra da peça; h_c é a altura da laje de concreto; e h_w é a altura da viga em madeira.

Para efeitos de cálculo, a influência do deslizamento na conexão é considerada na Equação 6, obtendo-se a rigidez efetiva da peça.

$$(EI_{ef}) = E_c \times I_c + \gamma_c \times E_c \times A_c \times \alpha_c^2 + E_w \times I_w + \gamma_w \times E_w \times A_w \times \alpha_w^2 \quad (6)$$

em que: I_c é o momento da inércia da seção transversal de concreto; e I_w é o momento da inércia da seção transversal de madeira.

Ainda, são necessárias as verificações relativas aos estados limites último (tensão normais e de cisalhamento internas) e de serviço (ligação e deslocamentos). A verificação da tensão normal de compressão na mesa de concreto é dada pelas Equações 7, 8 e 9.

$$\sigma_c = \gamma_c \times E_c \times \alpha_c \times \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (7)$$

$$\sigma_{m,c} = 0,5 \times E_c \times h_c \times \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (8)$$

$$\sigma_c + \sigma_{m,c} \leq f_{c,c} \quad (9)$$

nas quais: M é o momento fletor na seção considerada; σ_c é a tensão normal no centro de gravidade da área de concreto devido à força normal; $\sigma_{m,c}$ é a tensão normal na extremidade da área de concreto devido ao momento; e $f_{c,c}$ é a resistência do concreto à compressão.

Considerando o modelo proposto, deve-se verificar a tensão normal de tração na madeira (na extremidade inferior da peça mista), por meio das Equações 10 a 12:

$$\sigma_w = \gamma_w \times E_w \times \alpha_w \times \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (10)$$

$$\sigma_{m,w} = 0,5 \times E_w \times h_w \times \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (11)$$

$$\sigma_w + \sigma_{m,w} \leq f_{w,t} \quad (12)$$

em que: σ_w é a tensão normal no centro de gravidade do elemento em madeira devido à força normal; $\sigma_{m,w}$ é a tensão normal na extremidade do elemento em madeira devido ao momento; e $f_{w,t}$ é a resistência da madeira à tração.

A tensão máxima de cisalhamento, na linha neutra da viga mista, é dada pela Equação 13.

$$\tau_{w,max} = 0,5 \cdot E_w \times h^2 \times \frac{V}{(EI)_{ef}} \leq f_{v,0} \quad (13)$$

em que V é a força máxima de cisalhamento na seção considerada e $f_{v,0}$ é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

Dessa forma, a força cisalhante no sistema de conector é satisfeita conforme a Equação 14, em que R_{V1} é a força cisalhante resistente.

$$F = \gamma_c \times E_c \times A_c \times \alpha_c \times s \times \frac{V}{(EI)_{ef}} \leq R_{V1} \quad (14)$$

Dando início à particularidade do emprego da metodologia de dimensionamento no Brasil, a verificação dos estados limites de serviço é realizada conforme a normativa brasileira vigente para os materiais madeira e concreto, conforme as Equações 15 e 16, respectivamente.

$$u_{q,lim,w} \leq \frac{L}{200} \quad (15)$$

$$u_{q,lim,c} \leq \frac{L}{350} \quad (16)$$

em que: $u_{q,lim,w}$ é o deslocamento máximo no meio do vão para o elemento de madeira, conforme a ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997); $u_{q,lim,c}$ é o deslocamento máximo para o concreto sujeito à flexão no meio do vão, conforme a ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014); L é o vão considerado. Como não há uma normativa específica para esse caso, na qual deve ser adotada uma metodologia mais crítica, ambas as condições devem ser atendidas.

3 Resultados da pesquisa

Como exposto, evidencia-se no presente estudo o sistema de conexão entre materiais. Nesse contexto, tem-se o módulo de deslizamento do conector (K), fator intrinsecamente relacionado ao seu comportamento.

O módulo de deslizamento do conector, a priori, é obtido através de ensaios experimentais. Todavia, tratando-se de estruturas em madeira-concreto, não há ensaio padrão normatizado. Desse modo, os resultados apresentados na literatura têm como base o ensaio de cisalhamento direto proposto pela norma inglesa BS 5400 (BSI, 2005), “*Steel, concrete and composite bridges*”, para estrutura de aço-concreto. Ainda, tem-se na literatura sugestões dos modelos de corpos de prova a serem utilizados em tal ensaio, como proposto por Richart e Williams Junior (1943), Ceccotti (1995) e Pigozzo (2004).

Assim sendo, há grande variação nos resultados apresentados na literatura em função das grandes variações de modelos de ensaio. Na falta de padronização, não há um banco de dados significativo o suficiente para entendimento dos principais fatores que influenciam o deslizamento do conector e que devem ser considerados para efeitos de dimensionamento. Ainda, há o agravante da variabilidade da madeira: classificação (conífera ou dicotiledônea, que influi significativamente na estrutura e, portanto, nas propriedades mecânicas do material); espécies existentes, muitas ainda desconhecidas; e anisotropia da madeira.

Entretanto, na ausência de resultados experimentais, a normativa europeia determina que o valor do módulo de deslizamento em serviço (K_{ser}) pode ser obtido conforme a Equação 2, em função da densidade média do conjunto (ρ_m) e do diâmetro do conector empregado (d). A densidade média da madeira é um parâmetro intrinsecamente relacionado à umidade. A quantidade de água presente nesse material influi significativamente em suas propriedades e, portanto, em seu desempenho estrutural.

Como a madeira tem origem natural, após o corte há o início da perda de água para o ambiente. Tem-se que tal perda ocorre até que a umidade da madeira entre em equilíbrio com a umidade ambiente. A norma brasileira ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997), baseada no método probabilista dos estados limites, adota umidade de referência igual a 12%. Assim, uma espécie é comparada mecanicamente a outra considerando ambas na umidade de referência. A densidade da madeira é obtida considerando a umidade ambiente de referência e é dada como ρ_{12} (densidade da madeira a 12% de umidade).

Todavia, surge um questionamento quanto aos casos em que as condições ambientais impliquem numa resultante de umidade da madeira divergente da de referência. Desse modo, no intuito de considerar tais situações, a norma brasileira estabelece classes de umidade que visam ao ajuste das propriedades de resistência e rigidez da madeira, conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 ▼

Classes de umidade da madeira.

Fonte: adaptado de ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997)

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente	Umidade de equilíbrio da madeira
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% \leq U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% \leq U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$	$\geq 25\%$

Conhecida a classe de umidade da madeira supostamente em serviço, os valores de cálculo da resistência e da rigidez podem ser corrigidos em função dos coeficientes

de modificação $k_{mod.1}$, $k_{mod.2}$ e $k_{mod.3}$, que consideram a classe de carregamento e o tipo de material, o teor de umidade em serviço e a categoria da madeira, respectivamente (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003). Entretanto, na normativa brasileira nada se discute a respeito da correção do valor da densidade aparente, podendo as Equações 2 e 3, por vezes, conduzirem a um valor de módulo de deslizamento errôneo.

Ainda, a perda de umidade da madeira até a condição de equilíbrio ambiente acarreta a redução das dimensões do elemento nas três direções principais: axial, radial e tangencial. Portanto, há retração volumétrica. Ainda, por se tratar de um material anisotrópico, as retrações são distintas para cada direção considerada, o que provoca o surgimento de defeitos de secagem, tais como rachaduras, fendas e empenamento (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

Há também os efeitos dos defeitos naturais do material, tais como nós, desvios e deslocamento entre fibras, que também interferem nas propriedades mecânicas da madeira. Os nós provocam a interrupção das fibras, acarretando uma possível redução da resistência à tração e à compressão, dita proporcional à largura ocupante na peça (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

Nesse contexto, Capretti e Ceccotti (1996) monitoraram vigas compostas em madeira-concreto durante um período de cinco anos para verificação do comportamento de tais elementos perante as distintas condições de temperatura e umidade. Três vigas com 10 metros de vão foram analisadas em laboratório, quanto às deflexões, variação de umidade e temperatura.

Ainda, uma viga com vão de seis metros e mesmos parâmetros das demais foi submetida a cargas constantes em ambiente externo. Foram observados os deslocamentos verticais, o escorregamento da conexão e a variação de umidade e temperatura. Por fim, concluiu-se que a diminuição da umidade da madeira implica no encurtamento e acarreta a diminuição dos deslocamentos verticais e o aumento do deslizamento entre materiais. Em contrapartida, o aumento da umidade provoca o alongamento da madeira e aumenta o deslocamento vertical.

Tem-se que o emprego de madeiras com maiores teores de umidade deve ser evitado, ou então a estrutura deve permanecer escorada até a condição de equilíbrio da umidade. Outro fator constatado é de que o coeficiente de fluência, abordado pelo Eurocode 5 (CEN, 2004) para estruturas em madeira, não representa o fenômeno para elementos mistos, e há insegurança em sua consideração.

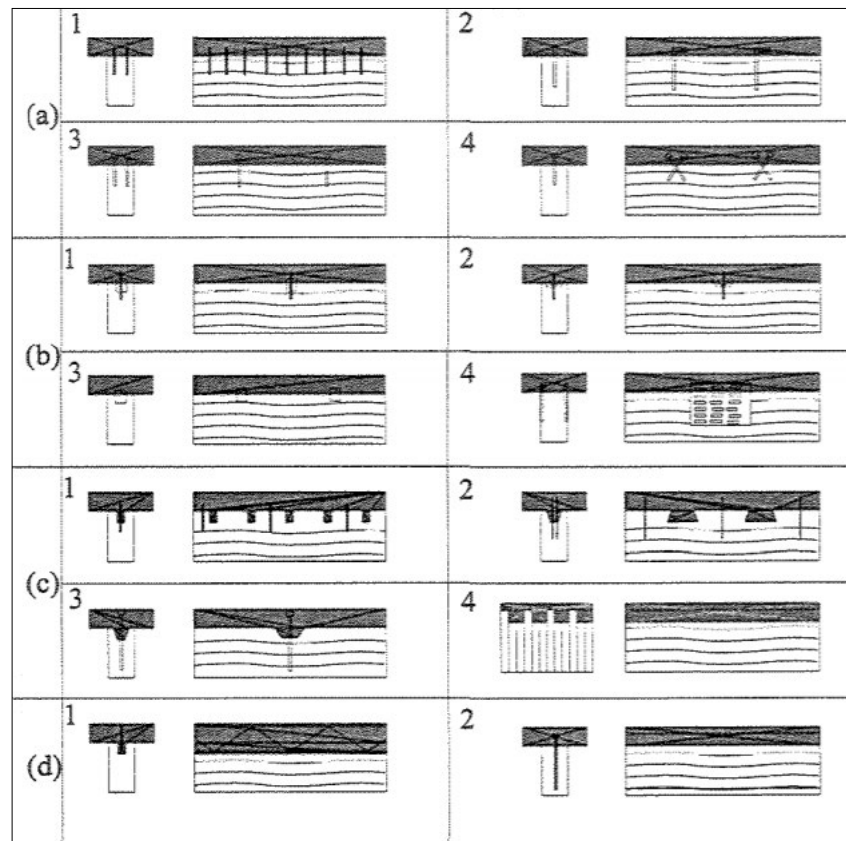
Ainda, os autores recomendam a não utilização da madeira com presença de medula ou fissuras que possam afetar a linha de conexão. Ceccotti (1995) apresenta que madeiras com elevados teores de extrativos ocasionam o retardamento da pega do concreto e podem ocasionar a diminuição da resistência do concreto na região de superfície de contato com a madeira, devido à tendência de absorção da água do concreto pela madeira; assim, recomenda-se a impermeabilização desta. Quanto à transferência de cisalhamento horizontal, esse processo não implica em alterações, pois despreza a aderência mecânica e a de atrito entre materiais.

As fendas, por sua vez, podem implicar na redução da resistência ao cisalhamento em peças submetidas à flexão. Ainda, contribuem para o acelerado apodrecimento da madeira. Outro fator importante, tratando-se de elementos mistos em madeira-concreto, é o sistema de conexão empregado. A Figura 3 indica os principais sistemas de conexão existentes.

Figura 3 ►

Sistemas de conexão em madeira-concreto.

Fonte: adaptado de Ceccotti (1995)



Da Figura 3, tem-se: (a1) pregos; (a2) barras de aço coladas; (a3/a4) parafusos; (b1/b2) anel partido e placas dentadas, respectivamente; (b3) tubos de aço; (b4) placas metálicas com dentes estampados; (c1) furos redondos na madeira e conectores para prevenir a separação; (c2) endentação quadrada; (c3) endentação em forma de cálice e barra de aço protendida; (c4) pranchas de madeira pregadas e placas de aço dispostas em fendas na altura das pranchas; (d1) treliça de aço colada na madeira; (d2) placa de aço colada na madeira (CECCOTTI, 1995).

Percebe-se que tais sistemas, ainda que apresentados em 1995, são os empregados e analisados por estudos mais recentes. A grande questão não é o sistema de conexão em si, e sim a posição do conector (“vertical” ou “inclinado”) em relação às fibras da madeira. Quando a barra é posicionada verticalmente, os esforços de cisalhamento decorrentes da flexão provocam o embutimento da madeira e/ou flexão do conector metálico na direção do fluxo de cisalhamento.

O modelo de conector na posição vertical é o proposto pelo Eurocode 5 (CEN, 2004), conforme exposto anteriormente. Contudo, o critério de ruptura para determinação da resistência ao embutimento é distinto para a normativa brasileira e para a europeia. A normativa brasileira ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997) define a resistência ao embutimento da ligação quando da deformação em 2%. Ainda, a resistência ao embutimento e a resistência à compressão paralela às fibras são obtidas de modos distintos, mas admitidas como equivalentes no cálculo de ligações conforme a normativa brasileira.

Almeida *et al.* (2014) afirmam que, para diversas situações, o cálculo de ligações por pinos metálicos apresentado pela normativa brasileira acarreta um número exagerado de pinos nas ligações.

Por sua vez, a normativa europeia Eurocode 5 (CEN, 2004) determina que a resistência ao embutimento é dada pela força que provoca o deslocamento de 5 mm

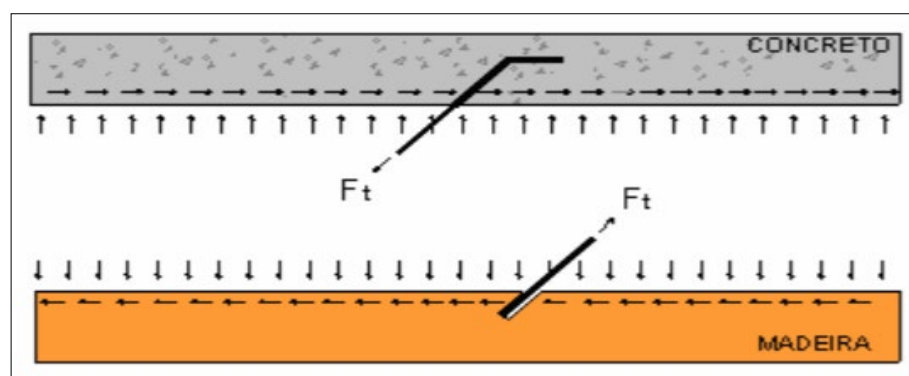
ou pela resistência última ao embutimento. Cabe ao projetista definir o critério a ser empregado no dimensionamento, uma vez que, conforme a literatura recente, falha na ligação ocorre pelo embutimento da madeira.

Ainda que não apresentado na normativa europeia, há o modelo de conector na posição inclinada. Conforme Pigozzo (2004), nesse modelo os mecanismos de deformação nos conectores tracionados também acarretam o embutimento da madeira. Nos conectores comprimidos, há ainda a formação de rótulas plásticas, que limitam sua resistência, somadas ao embutimento da madeira. No modelo inclinado, a solicitação de tração, conforme é apresentado na Figura 4, é a mais próxima das condições de serviço reais.

Figura 4 ►

Solicitação de tração para modo inclinado.

Fonte: adaptado de Pigozzo (2004)



Nesse contexto, desde 1995 até a literatura mais recente, tem-se que a utilização de conectores de cisalhamento posicionados em “X” proporciona o menor embutimento da madeira e o menor esmagamento do concreto na flexão, comparados a conectores verticais, conforme apresentam Ceccotti (1995), Pigozzo (2004), Molina, Calil Junior e Carreira (2009), Silva (2012) e Molina, Silva e Vasconcelos (2015). A Figura 5 retrata tal conexão.

Figura 5 ►

Confecção de vigas mistas com conectores tipo “X”.

Fonte: adaptado de Silva (2012)



Conforme os autores, tal modo de ligação é mais eficiente devido à possibilidade de transmissão de forças em duas direções até o limite da capacidade do aço. Caso haja maior região das peças de madeira, há melhor distribuição de tensões. Ainda, identifica-se menor sensibilidade quanto aos defeitos da madeira na área de ligação, aumento da resistência da madeira ao cisalhamento e um excelente comportamento de grupo. Tem-se que a disposição dos conectores em “X” resulta no aumento da rigidez em duas a dez vezes quando comparada a conectores dispostos na vertical. Nos estudos realizados por Molina,

Silva e Vasconcelos (2015), a falha ocorreu primeiramente na conexão entre materiais (cisalhamento dos conectores).

Assim sendo, considerando-se a literatura recente (PETRYCKI; SALEM, 2019; PIGOZZO *et al.*, 2018), tem-se que, para elementos mistos em aço-madeira, a conexão com disposição em “X” se mostra mais eficiente. Contudo, como não há formulação específica, deve-se obter o módulo de deslizamento (K) por meio de ensaios experimentais conforme os conectores a serem analisados.

Ainda considerando o modelo proposto pelo Eurocode 5 (CEN, 2004), tomando como base o modelo teórico correspondente à fase elástica, a literatura apresenta algumas constatações. Na avaliação de rigidez (EI) de vigas em madeira-concreto submetidas à flexão, o modelo tem boa correlação com os resultados experimentais quando as forças aplicadas são de até 50% do valor de ruptura obtido em ensaio. Todavia, quando este valor é superado, o modelo proposto pela normativa diverge de resultados experimentais em até 32%, conforme apresentam Molina, Silva e Vasconcelos (2015).

Assim sendo, há primordial necessidade de maior investigação do fenômeno da ligação em elementos mistos em madeira-concreto para elaboração de uma norma específica que atenda aos requisitos de dimensionamento e segurança das estruturas.

4 Conclusão

Com base no exposto, tem-se, primeiramente, a necessidade emergencial do desenvolvimento e normatização de um ensaio padrão em elementos mistos madeira-concreto para obtenção do módulo de deslizamento da conexão. Ainda, é de suma importância o desenvolvimento de uma normativa que apresente uma metodologia de dimensionamento específica para elementos mistos em madeira-concreto. Desse modo, recomenda-se maior atenção quanto à correção da densidade aparente para umidades distintas da referência.

Por fim, como apresentado pela literatura até o presente momento, o tipo de conexão entre madeira-concreto que tem se mostrado mais eficiente é o com disposição tipo “X”. Assim sendo, deve-se ampliar a investigação a respeito do tema de modo a desenvolver o equacionamento para determinação do módulo de deslizamento (K), como apresentado para conectores verticais.

Também há grande necessidade da realização de estudos a respeito dos efeitos do carregamento de longa duração, devido às constatações de redistribuição de tensões na seção transversal e, portanto, mudança de comportamento estrutural ao longo do tempo.

Ainda, é de suma importância a apresentação de um documento normativo referente a especificações de projeto, como impermeabilização da madeira e espaçamento entre conectores.

Tendo em vista a grande disponibilidade de madeiras de reflorestamento no Brasil, a falta de informações tecnológicas a seu respeito, seu mercado emergente e o fato de que o dimensionamento abordado pelo Eurocode 5 (CEN, 2004) foi elaborado com base nas espécies disponíveis na época e em sua região de análise, tornam-se necessários mais estudos na área, que levem em consideração as particularidades das espécies de reflorestamento brasileiras em estruturas mistas de madeira-concreto.

Assim sendo, deve-se, no âmbito nacional, desenvolver um dimensionamento que assegure as condições, as particularidades das madeiras disponíveis no mercado

brasileiro e as especificações para madeira, conforme abordado na normativa brasileira ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997).

Financiamento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Conflito de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ABNT – 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.

ALMEIDA, D. H.; FERRO, F. S.; VARANDA, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Comparação entre valores de ensaios experimentais e calculados da resistência ao embutimento da madeira de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 347-352, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200015>.

AQUINO, V. B. M.; FREITAS, M. V. P.; VASCONCELOS, C. Q.; ALMEIDA, J. P. B.; ARROYO, F. N.; RODRIGUES, E. F. C.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H.; SILVA, S. A. M.; SILVA, D. A. L.; PINHEIRO, R. V.; LAHR, F. A. R. Physical and mechanical characterization of *Planchonella pachycarpa* wood species for use in structural purpose. **Wood Research**, v. 66, n. 2, p. 267-276, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.37763/wr.1336-4561/66.2.267276>.

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5400-5 (2005)**: Steel, concrete and composite bridges. Part 5: Code of practice for the design of composite bridges. London: BSI, 2005.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.

CAPRETTI, S.; CECCOTTI, A. Service behaviour of timber-concrete composite beams: a 5-year monitoring and testing experience. *In*: INTERNACIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, 1996, New Orleans. **Proceedings** [...]. Madison: Omnipress, 1996.

CECCOTTI, A. Timber-concrete composite structures. *In*: BLASS, H. J.; ANNE, P.; CHOO, B. S.; GORLACHER, R.; GRIFFITHS, D. R.; HILSON, B. O.; RACHER, P.; STECK, G. **Timber engineering – STEP 2: Design – Details and structural systems**. 1st. ed. Almere: Centrum Hout, 1995. E13.

CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-2:2004**. Eurocode 5: Design of timber structures. Part 2: bridges. Brussels: CEN, 2004.

FERNÁNDEZ-CABO, J. L.; FERNÁNDEZ-LAVANDERA, J.; ÁVILA-JALVO, J. M. Wood-concrete and wood-wood mixed beams: rational basis for selecting connections. **Journal of Structural Engineering**, v. 134, n. 3, p. 440-447, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:3\(440\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:3(440)).

FRAGIACOMO, M.; CECCOTTI, A. Long-term behavior of timber–concrete composite beams. I: finite element modeling and validation. **Journal of Structural Engineering**, v. 132, n. 1, p. 13-22, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:1\(13\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:1(13)).

FRANGI, A.; FONTANA, M. Elasto-plastic model for timber-concrete composite beams with ductile connection. **Structural Engineering International**, v. 13, n. 1, p. 47-57, 2003. DOI: <https://doi.org/10.2749/101686603777964856>.

LAMEM – LABORATÓRIO DE MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS. **Seja bem vindo ao LaMEM!! 202?**. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/lamem/>. Acesso em: 8 out. 2021.

MOHLER, K. **Über das tragverhalten von biegetragern und druckstäben mit zusammengesetzten querschnitten und nachgiebigen verbindungsmiteln**. 1956. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe, 1956.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C.; CARREIRA, M. R. Pullout strength of axially loaded steel rods bonded in glulam at a 45° angle to the grain. **Materials Research**, v. 12, n. 4, p. 427-432, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000400010>.

MOLINA, J. C.; SILVA, M. A. A. A.; VASCONCELOS, R. P. Verificação da eficiência do modelo de Mohler na resposta do comportamento de vigas mistas de madeira e concreto. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 1, p. 29-40, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212015000100004>.

PETRYCKI, A. R.; SALEM, O. Structural fire performance of wood-steel-wood bolted connections with and without perpendicular-to-wood grain reinforcement. **Journal of Structural Fire Engineering**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1108/JSFE-02-2019-0016>.

PIGOZZO, J. C. **Estudos e aplicações de barras de aço coladas como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/T.18.2004.tde-20122006-103114>.

PIGOZZO, J. C.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H.; CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R. Behavior of shear connectors formed by bonded-in “X”

type steel bars in wood-concrete specimens. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 28, n. 5, p. 1-8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.9734/CJAST/2018/43127>.

RICHART, F. E.; WILLIAMS JUNIOR, C. B. Tests of composite timber-concrete beams. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 39, n. 2, p. 253-276, 1943. DOI: <https://doi.org/10.14359/8630>.

SILVA, M. A. A. A. **Aplicação de conectores metálicos para tabuleiros mistos de pontes de madeira e concreto para estradas vicinais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012. Disponível em: <http://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3475>. Acesso em: 10 dez. 2021.

YANG, H.; TANG, L.; CHEN, Y.; ZHANG, Y.; TAO, H.; LIU, W.; HU, J. Experimental study and theoretical analysis on mechanical behavior of timber-concrete composite beam-to-column joints. **Journal of Building Structures**, v. 42, n. 1, p. 113-124, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0070>.

YEOH, D.; FRAGIACOMO, M.; FRANCESCHI, M.; BOON, K. H. State of the art on timber-concrete composite structures: literature review. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, n. 10, p. 1085-1095, 2011. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000353](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353).

ZHANG, L.; ZHANG, S.; CHUI, Y.-H. Analytical evaluation to the timber-concrete composite beam connected with notched connections. **Engineering Structures**, v. 227, 111466, p. 13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111466>.