

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**DÉBORA KIMBERLY TAVARES SANTANA**

**ESTUDO SOBRE LAJES MISTAS EM MADEIRA-CONCRETO COM PARAFUSOS  
AUTOATARRAXANTES**

**CAMPO MOURÃO**

**2023**

**DÉBORA KIMBERLY TAVARES SANTANA**

**ESTUDO SOBRE LAJES MISTAS EM MADEIRA-CONCRETO COM PARAFUSOS  
AUTOATARRAXANTES**

**STUDY ABOUT COMPOSITE SLAB IN TIMBER-CONCRETE WITH SELF  
TAPPING SCREWS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes.

**CAMPO MOURÃO**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**DÉBORA KIMBERLY TAVARES SANTANA**

**ESTUDO SOBRE LAJES MISTAS EM MADEIRA-CONCRETO COM PARAFUSOS  
AUTOATARRAXANTES**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes.

Data de aprovação: 21/11/2023

---

Jorge Luís Nunes de Góes  
Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Campo Mourão

---

Fabiana Goia Rosa de Oliveira  
Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Campo Mourão

---

José Wilson dos Santos Ferreira  
Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Campo Mourão

**CAMPO MOURÃO**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que, em sua infinita graça, me concedeu saúde e sempre esteve comigo direcionando meus passos e dando sabedoria para lidar com os momentos difíceis que tive ao longo da minha jornada.

Agradecer aos meus queridos e amados pais, Eliseu e Irene, que nunca mediram esforços para fazer com que meus sonhos e metas fossem alcançados, sempre me incentivando com amor e apoio incondicional.

Agradeço também as minhas irmãs, Karini e Kamila, pelo companheirismo e apoio ao longo de toda vida.

Agradecer a todos os amigos que estiveram ao meu lado ao longo de toda graduação. Destaco aqui os amigos Lívia Vanessa, Helena Yakuda, Felipe Romero, Sabrina Letícia e João Victor. Em especial, meu amigo Ferdinando Salinas, que com muito esforço e dedicação contribuiu diretamente para que este trabalho fosse realizado.

Ao meu querido professor orientador, Jorge Luís Nunes de Góes, por sua dedicação e paciência, pois sem a sua assistência, este trabalho não teria sido realizado.

Agradecer ao técnico de laboratório, Fábio Kruger, por todo auxílio nos ensaios e pela boa vontade em ajudar durante a elaboração deste estudo.

Aos professores que, ao longo de toda graduação, compartilharam conhecimento com grande carinho e profissionalismo, em especial à professora Fabiana Goia Rosa de Oliveira.

## RESUMO

A associação de madeira e concreto é estruturalmente eficiente e oferece vantagens de aumento na rigidez do elemento composto, além de reduzir problemas relacionados a vibrações, isolamento acústico e peso próprio da estrutura. Nas estruturas mistas, os materiais do elemento composto são posicionados de forma que as propriedades físicas e mecânicas destes sejam aproveitadas de forma eficiente, sendo a linha neutra posicionada de tal forma que a madeira atue na porção mais tracionada e o concreto na porção mais comprimida do elemento estrutural. Este trabalho tem como objetivo avaliar, de forma experimental, o comportamento estrutural de duas vigas mistas em madeira-concreto, com parafusos autoatarraxantes inclinados a 45°, instalados em linha e em zigue-zague. A partir dos ensaios de ligações do tipo *push-out* realizados em quatro corpos de prova, foi possível obter o valor médio do módulo de deslizamento de 86412 N/mm e o valor médio de força de ruptura de 145498 N. A rigidez à flexão das vigas também foi estimada, bem como a eficiência destas, apresentando uma diferença de 6,3% em relação aos valores calculados segundo a norma CEN EN 1995-1 para a viga com conectores em linha e de 2,5% para a viga com conectores instalados em zigue-zague. Comprovou-se a influência dos conectores instalados a 45° (trabalhando à tração), sobre a rigidez do sistema de ligação.

Palavras-chave: estruturas mistas madeira-concreto; módulo de deslizamento; rigidez à flexão; método de dimensionamento.

## ABSTRACT

The association of timber and concrete is structurally efficient and offers the advantages of increasing the stiffness of the composite element, in addition to reducing problems related to vibrations, acoustic insulation and the structure's own weight. In mixed structures, the materials of the composite element are positioned in such a way that their physical and mechanical properties are used efficiently, with the neutral axis positioned in such a way that the timber acts on the most tensioned portion and the concrete on the most compressed portion of the structural element. This paper aims to evaluate, experimentally, the structural behavior of two mixed beams in timber-concrete, with self-tapping screws inclined at  $45^\circ$ , installed in a line and in a zig-zag. From the push-out connection tests performed on four specimens, it was possible to obtain the medium value of the slip modulus of 86412 N/mm and medium value of rupture force of 145498 N. The bending stiffness of the beams was also estimated, as well as their efficiency, presenting a difference of 6,3% in relation to the values calculated according to the CEN EN 1995-1 standard for the beam with in line connectors and 2,5% for the beam with connectors installed in a zig-zag. The influence of connectors installed at  $45^\circ$  (working in traction) on the stiffness of the connection system was proven.

Keywords: timber-concrete composite structures; slip modulus; bending stiffness; sizing method.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Detalhamento da viga tipo GCCB-1 .....	18
Figura 2 - Detalhamento da viga tipo GCCB-2 .....	18
Figura 3 - Posição dos ganchos na viga .....	19
Figura 4 - Tipos de ligação .....	21
Figura 5 - Modelo tridimensional .....	22
Figura 6 - Disposição dos conectores e entalhes .....	23
Figura 7 - Geometria dos corpos de prova (em mm) .....	24
Figura 8 - Curva força-deslocamento .....	25
Figura 9 - Diagrama força-deslizamento .....	26
Figura 10 - Geometria dos corpos de prova .....	27
Figura 11 - Comportamento elasto-plástico dos conectores .....	29
Figura 12 - Seção transversal da viga mista sujeita ao carregamento $q(x)$ .....	30
Figura 13 - Representação da seção mista e tensões normais.....	31
Figura 14 - Ensaio de compressão paralela às fibras .....	35
Figura 15 - Ensaio de densidade.....	35
Figura 16 - Preparação das peças de madeira.....	36
Figura 17 - Configuração do ensaio de flexão estática.....	37
Figura 18 - Ensaio de flexão estática.....	38
Figura 19 - Transdutores de deslocamento e contraventamento .....	38
Figura 20 - Ensaio de compressão .....	39
Figura 21 - Disposição de armadura (em mm).....	40
Figura 22 - Detalhe das armaduras da viga 1 (em mm).....	40
Figura 23 - Detalhe das armaduras da viga 2 (em mm).....	40
Figura 24 - Ensaio dos conectores .....	41
Figura 25 - Geometria do conector (em mm) .....	42
Figura 26 - Teste de <i>push-out</i> .....	43
Figura 27 - Ensaio de ligação R1 .....	44
Figura 28 - Montagem das vigas .....	45
Figura 29 - Concretagem das vigas .....	46
Figura 30 - Modo de ruptura dos parafusos.....	51
Figura 31 - Corpo de prova R1 .....	52
Figura 32 - Corpos de prova R2, R3 e R4 .....	52
Figura 33 - Comportamento dos corpos de prova .....	53
Figura 34 - Comparativo da força de ruptura.....	55
Figura 35 - Comparativo do módulo de deslizamento .....	55
Figura 36 - Rompimento da viga 1 .....	56
Figura 37 - Rompimento da viga 2.....	56
Figura 38 - Comportamento das vigas compostas .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas e geometria das vigas .....	19
Tabela 2 - Desempenho das vigas testadas.....	20
Tabela 3 - Resultados dos ensaios do tipo <i>push-out</i> .....	24
Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova.....	27
Tabela 5 - Valores médios dos resultados experimentais .....	28
Tabela 6 - Geometria dos corpos de prova .....	34
Tabela 7 - Geometria dos corpos de prova testados .....	36
Tabela 8 - Corpos de prova e conector metálico .....	43
Tabela 9 - Vigas ensaiadas .....	44
Tabela 10 - Ensaio de compressão paralela às fibras.....	48
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de teor de umidade .....	48
Tabela 12 - Ensaio de densidade .....	49
Tabela 13 - Ensaio de flexão estática nas almas .....	49
Tabela 14 - Classificação do agregado miúdo.....	50
Tabela 15 - Classificação do agregado graúdo .....	50
Tabela 16 - Ensaio de compressão.....	50
Tabela 17 - Resultado dos ensaios de tração nos parafusos.....	51
Tabela 18 - Resultados obtidos dos ensaios de ligações.....	53
Tabela 19 - Valores médios dos ensaios de ligações .....	54
Tabela 20 - Resultado dos ensaios de ligações .....	54
Tabela 21 - Rigidez à flexão das vigas .....	57
Tabela 22 - Ensaio de flexão estática da viga 1 .....	57
Tabela 23 - Ensaio de flexão estática da viga 2 .....	58



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
EPS	Poliestireno Expandido
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
MLC	Madeira Lamelada Colada
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
TCC	<i>Timber Concrete Composit</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras maiúsculas:

$A_c$	Área da seção transversal de concreto
$A_w$	Área da seção transversal da madeira
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_w$	Módulo de elasticidade longitudinal da madeira
$EI$	Rigidez à flexão
$(EI)_{exp}$	Rigidez à flexão experimental
$(EI)_{EC5}$	Rigidez à flexão segundo o EUROCODE 5
$(EI)_{total}$	Rigidez à flexão total
$F$	Força concentrada aplicada
$F_u$	Força máxima, força de ruptura
$I_c$	Momento de inércia da seção transversal de concreto
$I_t$	Momento de inércia da seção transversal de madeira
$K$	Módulo de deslizamento
$K_{ser}$	Módulo de deslizamento para Estado de Limites de Serviço
$K_u$	Módulo de deslizamento para Estado de Limites Últimos
$M$	Momento fletor
$M_c$	Momento fletor na seção transversal de concreto
$M_w$	Momento fletor na seção transversal de madeira
$N_c$	Força normal na seção de concreto
$N_w$	Força normal na seção de madeira
$Q_c$	Força cortante na seção transversal de concreto
$Q_w$	Força cortante na seção transversal de madeira
$R_1$	Força cortante admissível por conector
$S_{ef}$	Espaçamento efetivo

### Letras minúsculas:

$a_c$	Distância entre o centróide da área de concreto e o centróide da seção composta
$a_w$	Distância entre o centróide da área de madeira e o centróide da seção composta
$b_c$	Largura da peça de concreto
$b_w$	Largura da peça de madeira
$d$	Altura útil
$h$	Altura de uma peça
$h_c$	Altura da peça de concreto
$h_w$	Altura da peça de madeira
$p$	Comprimento do conector embutido no concreto ou vão da viga
$q$	Carregamento distribuído
$u$	Deslocamento axial
$u_c$	Deslocamento do centro de gravidade do concreto na direção de x
$u_w$	Deslocamento do centro de gravidade da madeira na direção de x
$w$	Deslocamento vertical
$y_c$	Fator parcial para concreto

$y_w$  Fator parcial para madeira

**Letras gregas minúsculas:**

$\Delta$  Deslocamento, flecha

$v_u$  Deformação última

$\rho_m$  Densidade média dos materiais

$\sigma$  Tensão de compressão

$\sigma_c$  Tensão de compressão ou tensão de compressão na altura do centróide da área de concreto

$\sigma_{m,c}$  Complemento para atingir a máxima tensão de compressão no concreto

$\sigma_w$  Tensão de tração na altura do centróide da alma de madeira

$\sigma_{m,w}$  Complemento para atingir a máxima tensão de tração na madeira

$\tau_{w,max}$  Tensão máxima de cisalhamento

**Letras gregas maiúsculas:**

$\Delta$  Deslocamento, flecha

$\Delta_u$  Deslocamento último, fleche última

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>Estruturas mistas em madeira-concreto .....</b>	<b>16</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelos teóricos para cálculo de estruturas mistas .....</b>	<b>25</b>
4.2.1	Módulo de deslizamento.....	25
4.2.2	Critério de cálculo - EUROCODE 5 .....	28
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização da madeira .....</b>	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Caracterização do concreto .....</b>	<b>38</b>
<b>5.3</b>	<b>Conector.....</b>	<b>41</b>
<b>5.4</b>	<b>Ensaio de ligações .....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
<b>6.1</b>	<b>Caracterização da madeira .....</b>	<b>48</b>
<b>6.2</b>	<b>Caracterização do concreto .....</b>	<b>50</b>
<b>6.3</b>	<b>Conector.....</b>	<b>51</b>
<b>6.4</b>	<b>Ensaio de ligações .....</b>	<b>51</b>
<b>6.5</b>	<b>Ensaio de flexão estática das vigas compostas.....</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas mistas em madeira-concreto têm ganhado notoriedade pela confiabilidade desse sistema estrutural e por ser uma técnica construtiva que demanda uma baixa emissão de gases poluentes quando comparada com estruturas apenas de aço e concreto. Vale pontuar que o setor da engenharia civil tem exigido soluções cada vez mais sustentáveis e ecológicas, tornando as características desse sistema ainda mais interessantes.

Nas estruturas mistas em madeira-concreto, a escolha de seções dos elementos que as compõe está diretamente relacionada com a posição da linha neutra. Esta é posicionada de tal forma que permita que a madeira atue na porção mais tracionada e o concreto na porção mais comprimida. Este processo de otimização do uso dos materiais permite que o sistema apresente um bom desempenho estrutural e maior resistência às solicitações.

No sistema *wood frame*, as lajes de piso são construídas com vigas de madeiras instaladas sobre as paredes estruturais, com painéis de OSB que formam a superfície do piso, sendo esta comumente revestida por materiais como madeira, laminado de madeira, revestimento cerâmico e carpetes. Quando comparado com sistemas que utilizam apenas a madeira em lajes de piso, a utilização da laje de concreto em sistemas mistos proporciona maior amortecimento vibracional e isolamento acústico, bem como benefícios em situações de incêndio, visto que o concreto também atua como uma barreira contra a propagação do fogo (Miotto, 2009).

Quando os elementos de uma estrutura mista são ligados de forma adequada, sua função estrutural pode ser desempenhada de maneira eficiente, desde que as condições de serviços sejam favoráveis e as propriedades de resistência e rigidez da ligação empregada cumpram os requisitos de projeto. Para garantir tais condições, é fundamental uma análise criteriosa sobre estes dispositivos de ligação (Mirdad e Chui, 2019).

Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma análise experimental do desempenho de lajes mistas em madeira-concreto com testes em corpos de prova de ligação e vigas em escala real.

## 2 OBJETIVOS

Neste capítulo são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo sobre lajes mistas em madeira-concreto.

### 2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como finalidade estudar o comportamento estrutural de vigas mistas em madeira-concreto com parafusos autoatarraxantes para uso em lajes de piso no sistema *wood frame*.

### 2.2 Objetivos Específicos

No intuito de alcançar o objetivo geral deste trabalho, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar os métodos de cálculo para o dimensionamento de estruturas mistas madeira-concreto disponíveis na literatura;
- Caracterizar os materiais utilizados na pesquisa por meio de ensaios normatizados;
- Determinar a resistência e rigidez da ligação madeira-concreto com parafusos autoatarraxantes, por meio de ensaios do tipo *push-out*;
- Avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de vigas mistas madeira-concreto com dimensões estruturais;
- Comparar os resultados obtidos com modelos analíticos previstos em documentos normativos e outros trabalhos.

### 3 JUSTIFICATIVA

A combinação de madeira e concreto em um elemento composto confere vantagens ao sistema, tornando-o mais rígido e reduzindo problemas relacionados a vibrações e isolamento acústico, além de apresentar alta resistência e durabilidade. Além disso, o aspecto arquitetônico resultante da combinação desses dois elementos evidencia uma estética agradável. Essas vantagens revelam que há um grande potencial a ser explorado nessa técnica construtiva.

Além disso, a aplicação das estruturas mistas envolve aspectos ambientais importantes. A madeira é um material renovável, com baixa emissão de dióxido de carbono - CO<sub>2</sub> e que proporciona maior eficiência energética ao sistema, visto que suas propriedades térmicas são superiores às do aço e do concreto.

O sistema misto madeira-concreto possui características significantes, tais como o aumento do amortecimento vibracional e melhor isolamento acústico quando comparado a estruturas feitas apenas de concreto ou de madeira, destacando-se, também, nos efeitos favoráveis de curvatura e estabilidade global desse tipo de estrutura. Além disso, a camada de concreto sobre a madeira atua de forma que o sistema tenha maior resistência à propagação de incêndio.

De acordo com Ceccotti (1995), as estruturas mistas podem apresentar capacidade de carga, aproximadamente, duas vezes maior que estruturas feitas somente de madeira e rigidez melhorada de três a quatro vezes.

Expostas tais considerações, este trabalho visa explorar os benefícios da utilização de estruturas mistas em madeira-concreto, bem como apresentar uma análise sistemática do desempenho estrutural de elementos compostos e do sistema de ligação constituído por parafusos autoatarraxantes, sendo este um tipo de ligação de fácil aplicação e com custo acessível no mercado.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, são apresentados os referenciais teóricos relacionados ao surgimento das estruturas mistas de madeira-concreto, bem como a classificação dos sistemas de ligação associados a esse tipo de estrutura e, por fim, os modelos de cálculo para o dimensionamento de estruturas mistas.

### 4.1 Estruturas mistas em madeira-concreto

Considerando o contexto ambiental atual, torna-se relevante o estudo de sistemas construtivos que permitam desenvolver estratégias mais ecológicas e eficientes para o uso adequado de determinados materiais na construção civil (Gutiérrez *et al.*, 2023).

O aumento do desmatamento, aliado a demanda excessiva de determinadas espécies de madeiras nativas, contribui para o desenvolvimento de estudos relacionados a racionalização de seu uso, bem como a utilização da madeira de reflorestamento (Miotto, 2009).

De acordo com Pigozzo (2004), ensaios de estruturas mistas para pisos foram realizados em 1914 pela empresa *Redpath Brow and Company*, em 1932 a empresa *Dominium Bridge Company* registrou alguns ensaios no Canadá. Entre as décadas de 20 e 30, muitas pontes e edifícios foram construídos adotando esse sistema. No ano de 1944, as estruturas mistas foram inseridas nas normas da *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* e, desde então, os modelos de cálculo e recomendações para a elaboração de estruturas mistas têm evoluído constantemente.

As estruturas mistas permitem que as propriedades físicas e mecânicas dos materiais de um elemento composto sejam aproveitadas de forma mais eficiente. Para o caso de estruturas mistas de madeira-concreto, cada material é posicionado de forma que o sistema obtenha melhor desempenho. A madeira é posicionada na região mais tracionada do sistema misto, enquanto o concreto absorve os esforços de compressão sobre o qual o sistema poderá ser submetido (Ling *et al.*, 2022).

Para que um elemento composto apresente uma boa performance, é necessário um sistema adequado de ligação entre os dois materiais. A resistência e rigidez das ligações empregadas em estruturas mistas madeira-concreto são fatores importantes que influenciam diretamente na eficiência da estrutura, tornando o



sistema estrutural mais rígido e impedindo o desprendimento vertical dos elementos conectados (Zhu *et al.*, 2019).

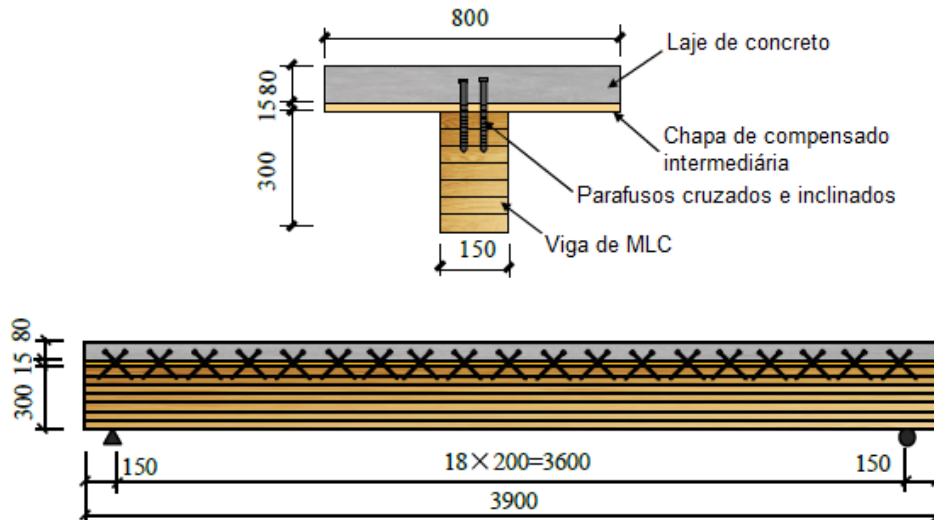
Diferentes tipos de conectores têm sido estudados a fim de proporcionar ligações mais simples, econômicas e eficientes. A grande diversidade de conectores e a maneira como são empregados faz com que a resistência e rigidez destes devam ser determinados de forma experimental.

É comum o emprego de elementos metálicos para ligar os materiais de um sistema misto em madeira-concreto. Por apresentarem deformações que permitem o deslizamento entre os materiais, as ligações com essa característica podem ser admitidas como sendo ligações semi-rígidas. Esse tipo de ligação tem ganhado notoriedade e tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores (Di Nino; Gregori; Fragiacomio, 2020; Sebastian *et al.*, 2017; Yeoh; Fragiacomio; Deam, 2011).

Estudos sobre as estruturas mistas de madeira-concreto vêm ganhando reconhecimento global devido ao alto desempenho e estabilidade desse tipo de sistema. Investigações relacionadas ao tema foram feitas por Siddika *et al.* (2021), que realizaram a análise estrutural de um piso composto de madeira lamelada cruzada (CLT) e concreto. As variáveis, nessa pesquisa, foram as propriedades da madeira, os sistemas de ligação e o detalhamento da laje de concreto. Os autores concluíram que os pisos de CLT-concreto, quando sujeitos a ações sísmicas, não apresentam deformações permanentes e que o sistema de ligação semi-rígida auxilia na dissipação da energia decorrente dessas ações.

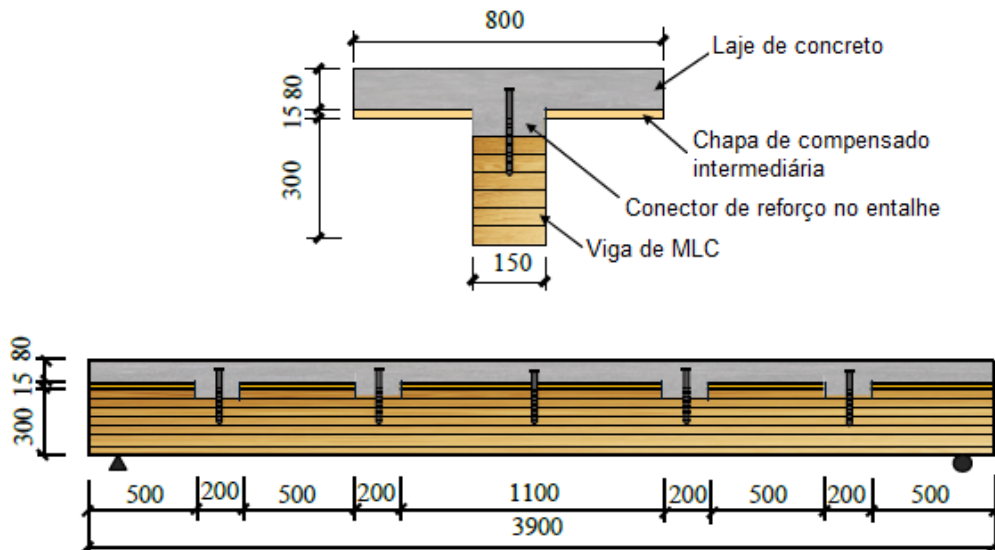
Em Du *et al.* (2021), os pesquisadores fizeram ensaios para analisar o comportamento e pontuar as principais diferenças entre duas vigas T compostas. Uma das vigas possuía uma mesa de concreto ligada a alma de madeira lamelada colada (MLC) por conectores metálicos cruzados a 45° em relação às fibras da madeira, com uma chapa de compensado intermediária (Figura 1). Já na outra viga composta, a mesa de concreto foi conectada a alma de madeira lamelada colada (MLC) por entalhes reforçados com parafusos autoatarraxantes e uma chapa de compensado intermediária (Figura 2).

**Figura 1 - Detalhamento da viga tipo GCCB-1**



Fonte: Adaptado de Du et al. (2021)

**Figura 2 - Detalhamento da viga tipo GCCB-2**



Fonte: Adaptado de Du et al. (2021)

Os resultados apontaram que a rigidez e resistência a flexão da viga tipo GCCB-1 foram maiores do que a viga GCCB-2, isso porque a viga GCCB-1 possui maior densidade de conectores ao longo de seu comprimento, permitindo que os esforços cortantes fossem distribuídos de maneira apropriada entre os elementos conectados.

Miotto e Dias (2015) investigaram o comportamento de oito vigas mistas de MLC-concreto com comprimento de 5,4 m. As propriedades mecânicas, a geometria das vigas e a nomenclatura de cada uma são apresentadas na Tabela 1.

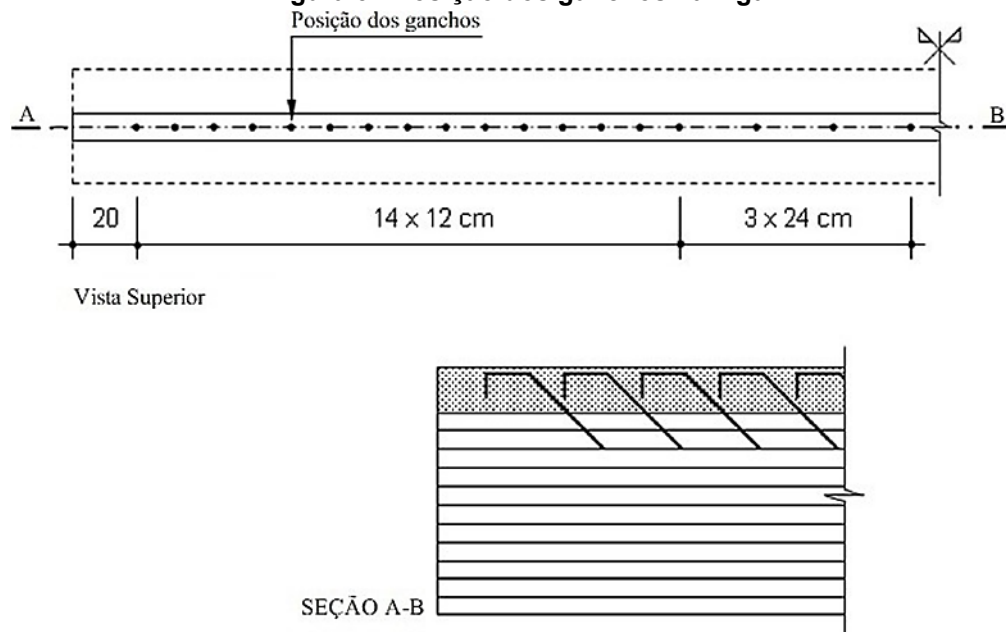
**Tabela 1 - Propriedades mecânicas e geometria das vigas**

Vigas	Largura (mm)	Altura (mm)	Módulo de elasticidade – valor médio entre as lâminas (MPa)	Reforço com fibra de vidro	Mesa de concreto
V1	82	312	21.226	Não	Sim
V2	83	313	20.623	Não	Sim
V3	81	314	20.466	Sim	Não
V4	80	312	20.199	Sim	Sim
V5	83	317	20.046	Sim	Não
V6	84	312	20.020	Sim	Sim
V7	83	310	20.113	Não	Não
V8	81	311	19.770	Não	Não

Fonte: Adaptado de Miotto e Dias (2015)

Para as vigas V1, V2, V4 e V6 foram utilizados ganchos de aço com 8 mm de diâmetro (a 45° em relação ao eixo da viga), sendo o espaçamento entre eles de 12 cm na região de maior tensão de cisalhamento e distribuídos a cada 24 cm no terço central da viga, impedindo a separação dos materiais. A Figura 3 indica o posicionamento dos ganchos de uma extremidade até o centro da viga.



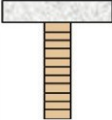
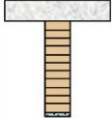
**Figura 3 - Posição dos ganchos na viga**



Fonte: Adaptado de Miotto e Dias (2015)

A partir da Tabela 2, é possível observar o desempenho das vigas ensaiadas. Em que  $F_u$  representa a força de ruptura,  $(EI)_{exp}$  a rigidez experimental e  $(EI)_{total}$  a rigidez total das vigas.

Tabela 2 - Desempenho das vigas testadas

TIPO DE VIGA	VIGAS	$F_u$ (mm)	$(EI)_{exp}$ (N.mm <sup>2</sup> )	$(EI)_{total}$ (N.mm <sup>2</sup> )	$\frac{(EI)_{exp}}{(EI)_{total}}$
 MLC	V7	101,7	4,3383E+12	4,4805E+12	0,97
	V8	84,3	4,3263E+12	4,3541E+12	0,99
	<b>MÉDIA</b>	<b>93,0</b>	<b>4,3323E+12</b>	<b>4,4173E+12</b>	<b>0,98</b>
 MLC + FIBRA DE VIDRO	V3	112,5	5,3703E+12	5,8042E+12	0,93
	V5	121,3	5,3736E+12	5,9685E+12	0,90
	<b>MÉDIA</b>	<b>116,9</b>	<b>5,3720E+12</b>	<b>5,8863E+12</b>	<b>0,92</b>
 MLC-CONCRETO	V1	173,6	1,0631E+13	1,8043E+13	0,59
	V2	89,5	1,1185E+13	1,7857E+13	0,63
	<b>MÉDIA</b>	<b>131,6</b>	<b>1,0908E+13</b>	<b>1,7950E+13</b>	<b>0,61</b>
 MLC-CONCRETO + FIBRA DE VIDRO	V4	157,4	1,1796E+13	2,1118E+13	0,56
	V6	127,6	1,3330E+13	2,1338E+13	0,62
	<b>MÉDIA</b>	<b>142,5</b>	<b>1,2563E+13</b>	<b>2,1228E+13</b>	<b>0,59</b>

Fonte: Adaptado de Miotto e Dias (2015)

Outra análise experimental foi realizada por Otero-Chans *et al.* (2018) em uma viga composta madeira-concreto conectados por placas de aço perfuradas, com a mesa de concreto reforçada com fibra (*SikaFiber M48*) para evitar os efeitos de retração. Como ilustra a Figura 4, três tipos de ligações foram testadas: placas não reforçadas, reforço com barras de aço dispostas perpendicularmente às placas e barras de aço dispostas paralelamente ao longo delas, com dois conectores de comprimentos diferentes para os três tipos de ligações propostas.

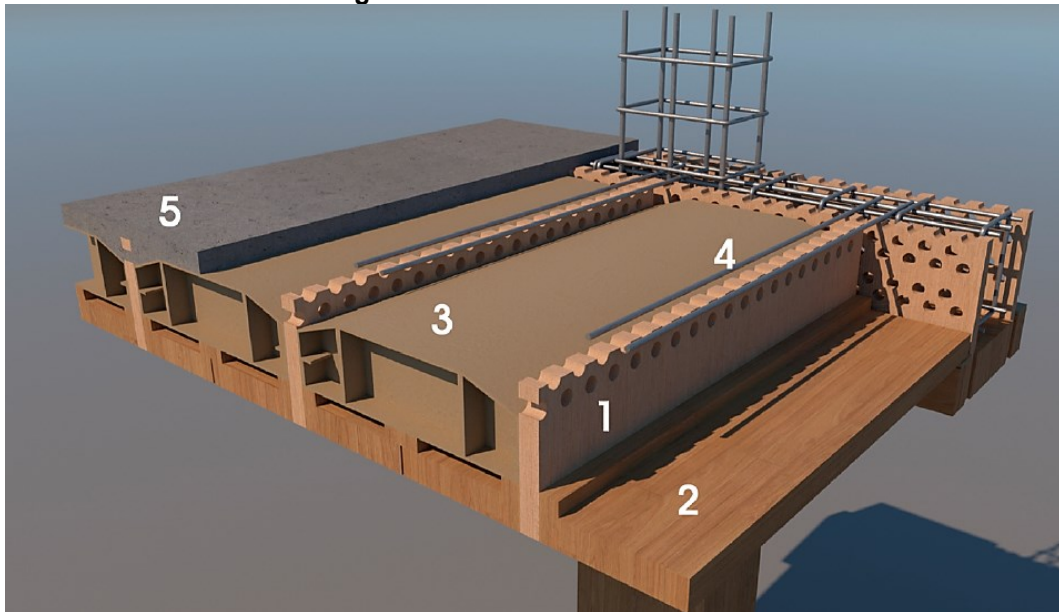
**Figura 4 - Tipos de ligação**



**Fonte: Adaptado de Otero-Chans *et al.* (2018)**

Notou-se que a adição de armadura como reforço nas placas, tanto no sentido longitudinal como no sentido transversal, não proporcionou um aumento significativo da resistência ao cisalhamento nas ligações propostas. O trabalho ainda aponta que as armaduras transversais reduziram a fissuração associada à ruptura dos corpos de prova e que a fissuração no concreto diminuiu devido ao uso da fibra de reforço. No estado limite de serviço, o concreto reforçado não foi fissurado.

Em Gutiérrez *et al.* (2023) foi elaborado um sistema de piso misto madeira-concreto em escala real, visando limitar o uso de adesivos estruturais e elementos metálicos, bem como facilitar a desmontagem do sistema para viabilizar a reciclagem dos elementos compostos. A ligação trata-se de uma placa de compensado perfurada com uma camada de concreto moldado in loco na parte superior do elemento. A base é composta por madeira lamelada colada. Os autores ainda sugerem que o preenchimento pode ser feito com blocos de diferentes materiais (blocos de EPS, blocos de materiais recicláveis etc.). Assim como demonstrado na Figura 5, o elemento 1 representa a chapa de compensado perfurada, o elemento 2 a peça de MLC, o elemento 3 os blocos de preenchimento, o elemento 4 as barras de aço de reforço e o elemento 5 a laje de concreto.

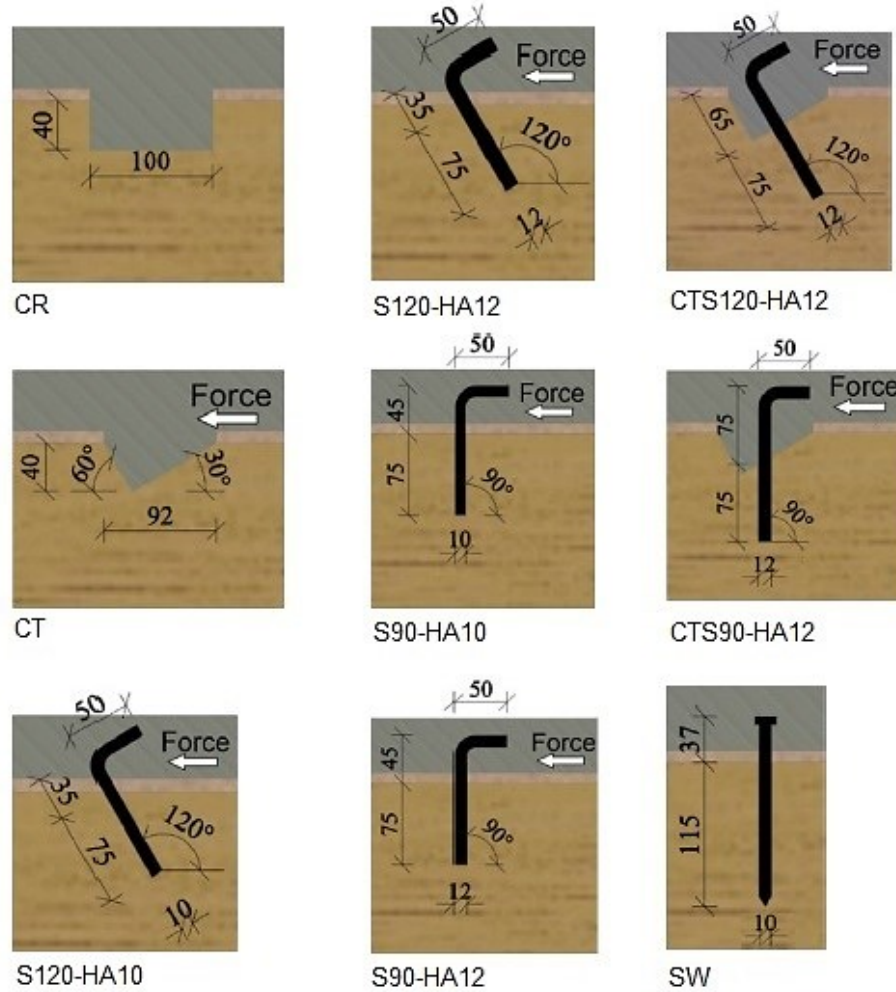
**Figura 5 - Modelo tridimensional**

Fonte: Gutiérrez *et al.* (2023)

A análise dos resultados indicou que o tipo de ligação empregado reduz o consumo de adesivo e metal quando comparado aos outros tipos de ligações usuais. Outro fator importante é que esse sistema possui baixo peso próprio, sendo mais vantajoso quando comparado às estruturas feitas somente de concreto.

Nove corpos de prova misto em madeira-concreto, com sistema de ligação com barras de aço roscáveis e entalhes, foram testados a partir de ensaios do tipo *push-out* por Djoubissie *et al.* (2018). Quatro destes elementos foram ensaiados com ligações de barras de aço roscáveis, dois apenas com entalhes, dois com a combinação de entalhes reforçados com barras de aço roscáveis e um com parafuso de aço com rosca soberba. A Figura 6 ilustra os tipos de ligação testadas, com o posicionamento dos conectores e geometria dos entalhes.

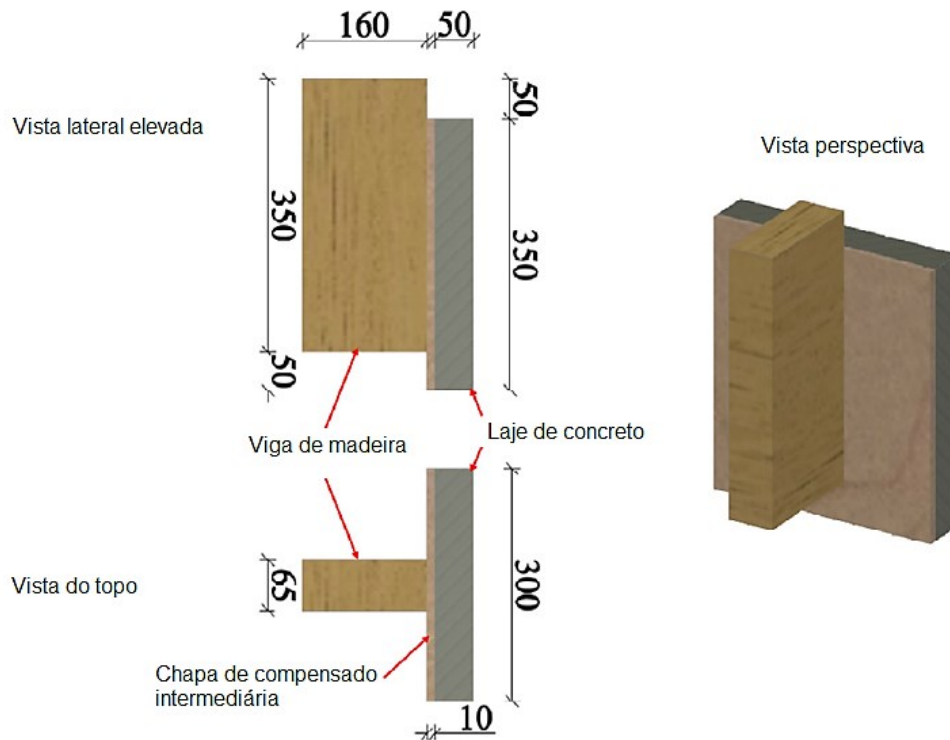
Figura 6 - Disposição dos conectores e entalhes



Fonte: Adaptado de Djoubissie *et al.* (2018)

Os ensaios foram realizados com elementos com configuração assimétrica, assim como apresentado na Figura 7. Cada corpo de prova testado contém apenas um conector instalado.

**Figura 7 - Geometria dos corpos de prova (em mm)**



Fonte: Adaptado de Djoubissie et al. (2018)

Os valores de módulo de deslizamento ( $K_{ser}$ ), rigidez efetiva à flexão  $(EI)_{exp}$  e deslocamento ( $\Delta$ ) referente a cada corpo de prova testado estão resumidos na Tabela 3.

**Tabela 3 - Resultados dos ensaios do tipo *push-out***

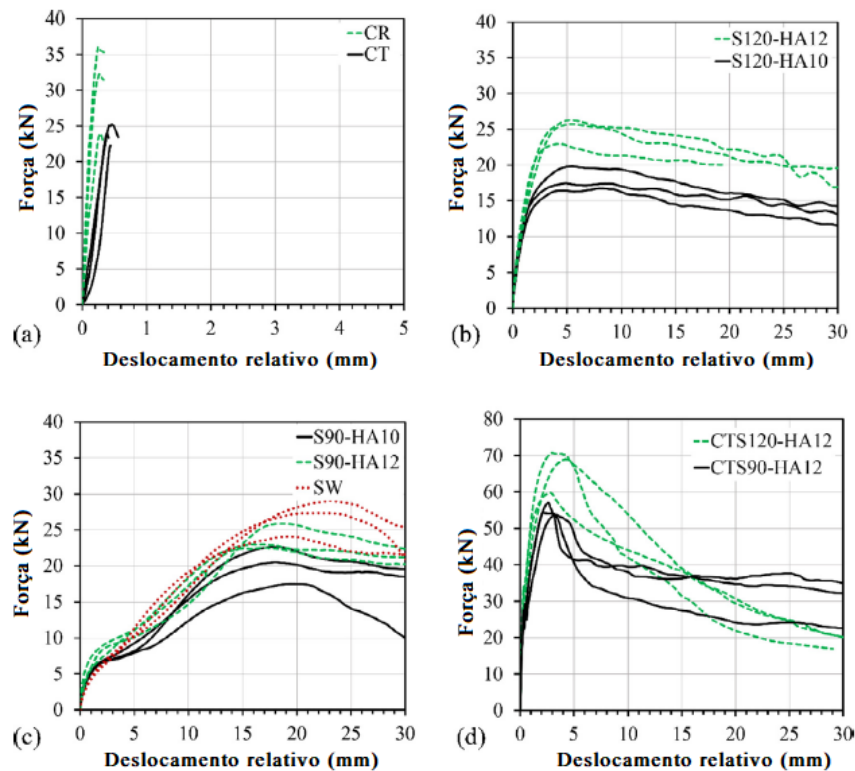
CONEXÕES	$K_{ser}$ (N/mm)	ESPAÇAMENTO (mm)	$EI_{exp}$ (N.mm <sup>2</sup> )	$\Delta_u$ (mm)	$\frac{(EI)_{exp}}{(EI)_{teo}}$
CR	175900	300	1,61E+12	1,6	0,88
CT	48000	300	1,24E+12	2,1	0,67
S120-HA10	15500	100	1,23E+12	2,2	0,67
S120-HA12	15400	100	1,23E+12	2,2	0,67
S90-HA10	2000	100	0,62E+12	4,2	0,34
S90-HA12	2900	100	0,70E+12	3,7	0,38
CTS120-HA12	115100	300	1,51E+12	1,7	0,82
CTS90-HA12	94900	300	1,46E+12	1,8	0,79
SW	2000	100	0,63E+12	4,2	0,34

Fonte: Adaptado de Djoubissie et al. (2018)

Os autores concluem que, para as ligações com entalhe, a rigidez é alta e a ruptura é frágil. Os outros conectores apresentam menor rigidez com uma ruptura plástica. Na Figura 8, é possível observar, através da curva de força-deslocamento, que as ligações com entalhes falharam antes dos outros tipos de ligações.



**Figura 8 - Curva força-deslocamento**



Fonte: Adaptado de Djoubissie *et al.* (2018)

Foi possível observar que, para as ligações que combinam entalhe e barra de aço (CTS120-HA12 e CTS90-HA12), a resistência ao cisalhamento foi maior do que para os outros tipos de ligações e que as ligações utilizando barras de aço inclinadas a 120° apresentaram maior valor de rigidez em comparação as barras a 90°.

## 4.2 Modelos teóricos para cálculo de estruturas mistas

Nesta seção, apontam-se os principais parâmetros que devem ser levados em consideração no dimensionamento das estruturas mistas, de acordo com os modelos teóricos já existentes.

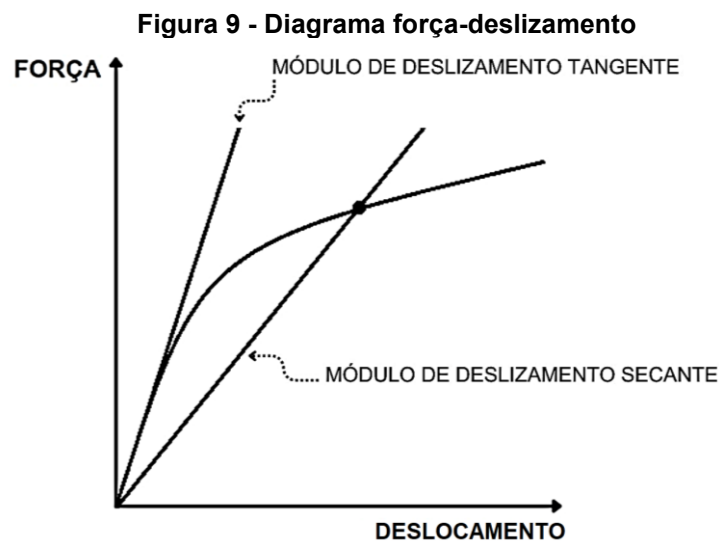
### 4.2.1 Módulo de deslizamento

Em um elemento composto por dois materiais com propriedades físicas e mecânicas diferentes, sem nenhum elemento de ligação entre esses, as deformações a que estão sujeitos distribuem-se de forma contínua ao longo da altura de cada elemento. Quando esses elementos são interligados, parte do deslizamento entre eles é restringido pelos conectores, gerando uma interação entre eles (Góes, 2002).

Em uma estrutura mista, a rigidez da ligação entres os diferentes materiais que a compõe é representada pelo módulo de deslizamento, quantificando a resistência ao deslocamento paralelo à superfície de contato dos materiais oferecida pelo sistema de ligação (Soriano, 2001).

Baseando-se nas indicações contidas na norma europeia referente a estrutura mista em aço e concreto CEN EN 1994-1: 2004, Ceccotti (1995) propôs um modelo para cálculo do módulo de deslizamento de serviço,  $K_{ser}$ , e o módulo de deslizamento último,  $K_u$ . O valor de  $K_{ser}$  é obtido através da inclinação da reta secante definida no início da curva força-deslocamento até o ponto onde atinge-se 40% da força de ruptura e, conseqüentemente, obtém-se seu respectivo deslocamento. O valor de  $K_u$  é equivalente a 2/3 do valor de  $K_{ser}$ .

O comportamento dos conectores pode ser descrito por um diagrama de força-deslizamento com comportamento característico não-linear, como representa a Figura 9.



A rigidez dos conectores e a maneira como são dispostos na estrutura são variáveis importantes para análise do módulo de deslizamento. Um estudo analítico com conectores instalados em ângulos de 45° e 90° foi desenvolvido por Appavuravther, Vandoren e Henriques (2021) para avaliar rigidez e a capacidade de carga de dezoito corpos de prova em MLC-concreto leve de baixa resistência, sendo três corpos de prova para cada modelo de ligação. A identificação dos corpos de prova é dada da seguinte forma: parafuso - diâmetro do parafuso (mm) - comprimento do parafuso (mm) - ângulo de furação do parafuso - número de corpos de prova. As

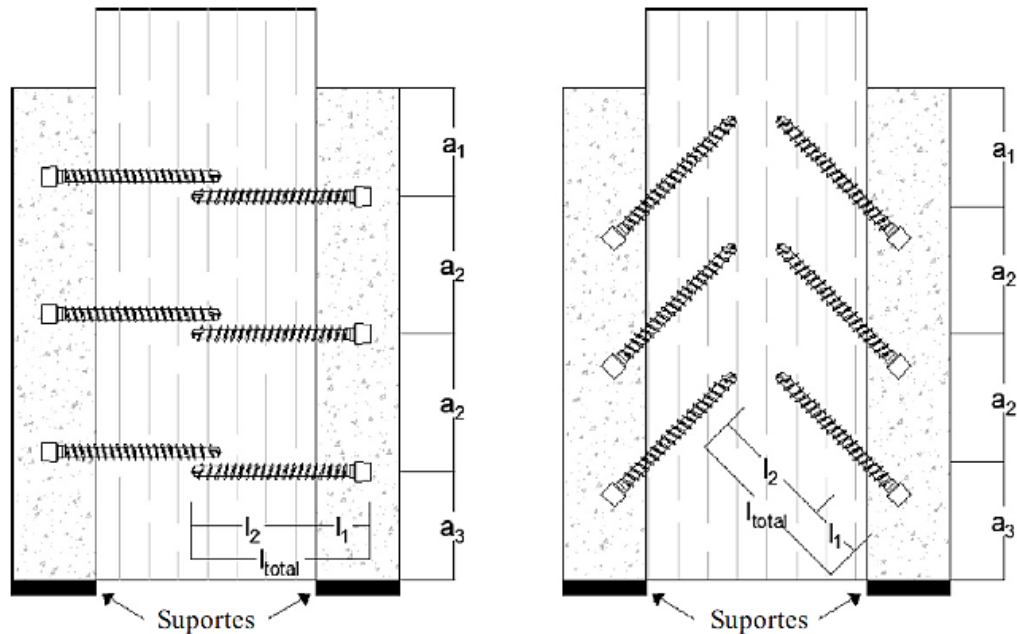
dimensões e geometria dos corpos de prova estão dispostas na Tabela 4. A Figura 10 apresenta a geometria dos corpos de prova testados. O sistema possui os conectores instalados a 45° de forma que estes trabalhem à compressão.

**Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova**

IDENTIFICAÇÃO	d	$l_{total}$	$\alpha$	$l_1$	$l_2$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
S-M8-160-45	8	160	45	110	50	120	130	120
S-M8-200-45	8	200	45	150	50	120	130	120
S-M10-200-45	10	200	45	150	50	110	130	130
S-M8-160-90	8	160	90	110	50	110	130	130
S-M8-200-90	8	200	90	150	50	110	130	130
S-M10-200-90	10	200	90	150	50	135	140	105

Fonte: Adaptado de Appavuravther, Vandoren e Henriques (2021)

**Figura 10 - Geometria dos corpos de prova**



Fonte: Adaptado de Appavuravther, Vandoren e Henriques (2021)

Os principais parâmetros avaliados no teste com os corpos de prova com os parafusos a 90° e 45° estão resumidos na Tabela 5, sendo estes os valores médios obtidos. O módulo de deslizamento de serviço ( $K_{ser}$ ) e o deslocamento ( $\Delta_u$ ) foram determinados utilizando o deslizamento correspondente à 80% da força máxima de ruptura ( $F_u$ ).

Tabela 5 - Valores médios dos resultados experimentais

IDENTIFICAÇÃO	$K_{ser}$ (N/mm)	$F_u$ (N)	$\Delta_u$ (mm)
S-M8-160-45	28930	23340	10,29
S-M8-200-45	20790	24200	6,93
S-M10-200-45	33870	35450	9,53
S-M8-160-90	6850	44060	12,28
S-M8-200-90	9370	45390	10,96
S-M10-200-90	14430	42150	9,81

Fonte: Adaptado de Appavuravther, Vandoren e Henriques (2021)

Os autores concluíram que os parafusos inclinados a 45° à compressão apresentaram valor de rigidez superior, quando comparados com os parafusos instalados a 90°. Já com relação a capacidade máxima de carga, os conectores instalados a 45° à compressão apresentaram resultados inferiores.

#### 4.2.2 Critério de cálculo - EUROCODE 5

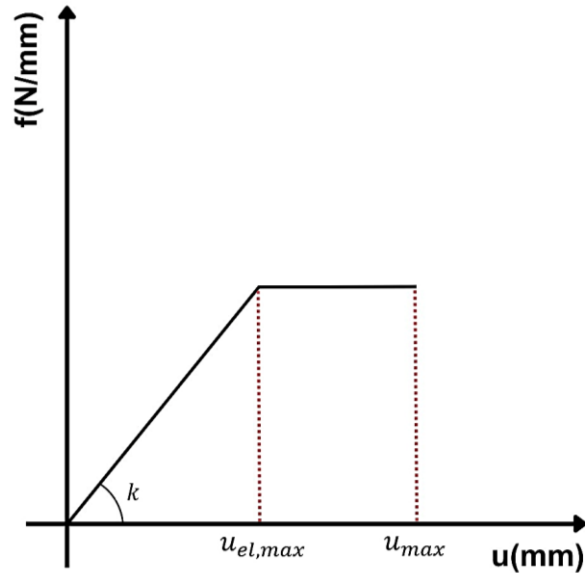
Algumas variáveis são essenciais para que uma solução analítica apresente resultados satisfatórios. Para soluções que levam em consideração a rigidez da ligação em vigas mistas, fatores como as condições de apoio, a geometria do elemento, as condições de carregamento e o comportamento dos materiais envolvidos não devem divergir dos modelos analíticos lineares (MIOTTO, 2009).

O mesmo autor enfatiza que o modelo analítico considerado deve ser utilizado apenas para peças em flexão simples, atendendo as seguintes hipóteses gerais e convenções:

- O deslocamento vertical é dado pela função  $w(x)$ , sendo que o mesmo valor é atribuído para os dois elementos, assumindo que não há separação entre o concreto e a madeira.
- A seção transversal permanece plana e as deformações por cisalhamento nos dois materiais não são consideradas.
- Deve-se atribuir sinal negativo às resistências e às tensões à compressão.
- A madeira e o concreto possuem comportamento elástico-linear.
- Os conectores são espaçados igualmente.
- A relação força-deslocamento é igual para todos os conectores, que é simplificada como elástico-linear até a capacidade de carga do conector e a partir desse ponto como plástico ideal, assim como ilustra a Figura 11.

- Os conectores são admitidos como se fossem ligações contínuas, com módulo de deslizamento por unidade de comprimento,  $K$ .
- O atrito entre a madeira e o concreto são desconsiderados, sendo a força de cisalhamento na interface transmitida somente pelos conectores.

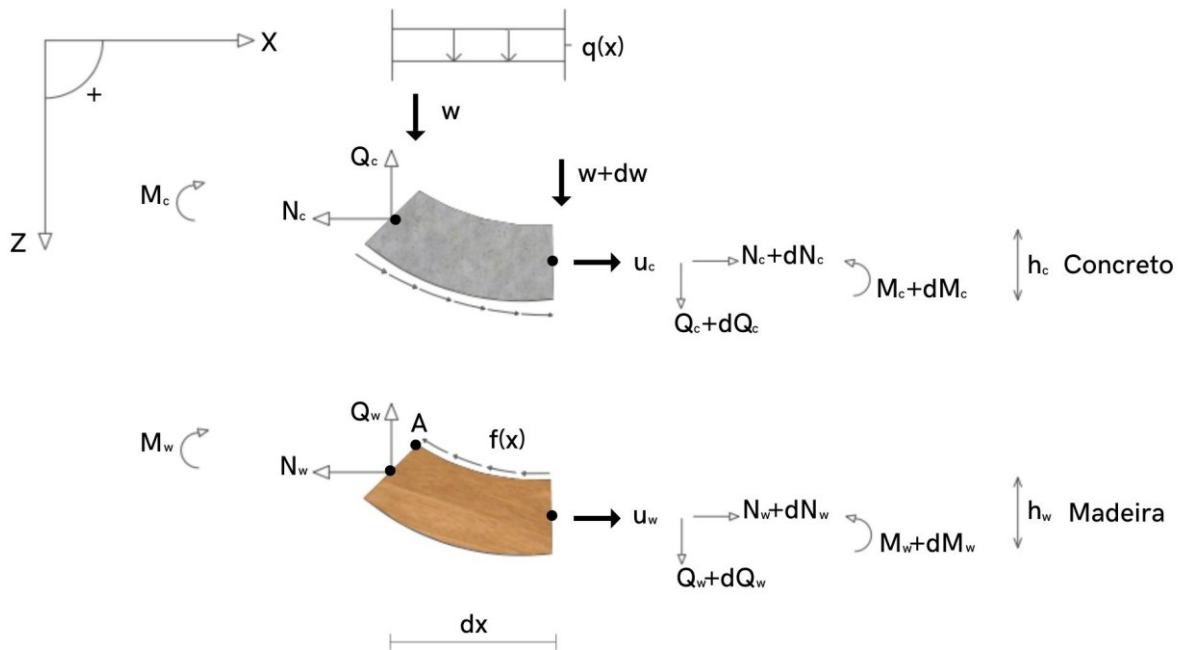
Figura 11 - Comportamento elasto-plástico dos conectores



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 12 ilustra uma seção transversal de uma viga mista sujeita a um carregamento  $q(x)$  e a partir dela é possível observar todas as variáveis necessárias para análise de vigas mistas em madeira-concreto através o modelo mencionado nesta seção.

Figura 12 - - Seção transversal da viga mista sujeita ao carregamento  $q(x)$



Fonte: Autoria própria (2023)

A norma CEN EN 1995-1: 2004 considera a influência do deslizamento na interface do sistema através da adoção de um produto de rigidez,  $EI_{ef}$ , calculado de acordo com a Equação 1, em que o valor obtido é proveniente da forma da seção transversal, dos módulos de elasticidade da madeira e do concreto, do espaçamento entre os conectores e do módulo de deslizamento da ligação.

$$(EI_{ef}) = E_c I_c + y_c E_c A_c a_c^2 + E_w I_w + y_w E_w A_w a_w^2 \quad (1)$$

Onde  $E_c$ ,  $E_w$ ,  $I_c$ ,  $I_w$ ,  $A_c$  e  $A_w$  representam os valores médios dos módulos de elasticidade, os momentos de inércia e as áreas da seção transversal do concreto e da madeira, respectivamente. As distâncias são representadas por  $a_c$  e  $a_w$  e são calculadas de acordo com a Equação 2 e Equação 3.

$$a_c = \frac{(h_c + h_w)}{2} - a_w \quad (2)$$

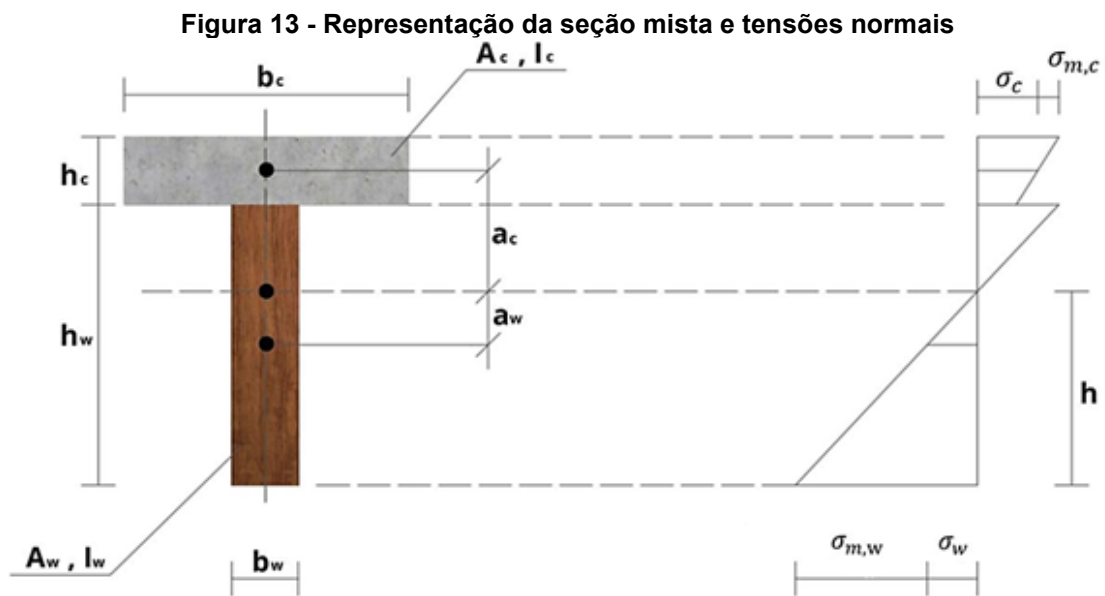
e

$$a_w = \frac{y_c E_c A_c (h_c + h_w)}{2(y_c E_c A_c + y_w E_w A_w)} \quad (3)$$

Sendo  $y_c$  o fator parcial da mesa de concreto calculado de acordo com a Equação 4.

$$y_c = \left(1 + \frac{\pi^2 E_c A_c s}{K \cdot \ell^2}\right)^{-1} \quad (4)$$

Na Equação 4, a constante  $K$  indica o módulo de deslizamento da ligação,  $s$  é o espaçamento dos conectores e  $\ell$  é o comprimento do vão teórico da viga. O valor de  $h_c$  e  $h_w$ , presente nas Equações 2 e 3, referem-se as alturas representadas na Figura 13.



Fonte: Autoria própria (2023)

A norma CEN EN 1995-1: 2004 recomenda que o vão teórico,  $\ell$ , seja igual a:

- O próprio vão, para vigas bi-apoiadas.
- 0,8 do vão, para vigas contínuas.
- 2 vezes o comprimento do balanço.

Para o cálculo do módulo de deslizamento de serviço,  $K_{ser}$ , em função da densidade média da madeira,  $\rho_m$  (kg/m<sup>3</sup>), e do diâmetro dos conectores,  $d$  (mm), a norma CEN EN 1995-1: 2004 estabelece a Equação 5. O documento normativo recomenda que, para ligações entre madeira e concreto,  $K_{ser}$  deve ser multiplicado por 2.

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

Para análises dos estados de limites últimos, o módulo de deslizamento,  $K_u$ , é dado pela Equação 6.

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (6)$$

Para o cálculo das tensões normais na seção transversal do elemento ilustrado na Figura 13, têm-se a Equação 7 para obter a tensão de compressão na porção de concreto, a Equação 8 para obter o complemento e atingir máxima tensão de compressão no concreto, a Equação 9 para cálculo da tensão de tração na madeira e a Equação 10 para obter o complemento e atingir a máxima tensão de tração na madeira.

$$\sigma_c = y_c E_c a_c \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (7)$$

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

e

$$\sigma_w = y_w E_w a_w \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (9)$$

$$\sigma_{m,w} = 0,5 E_w h_w \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (10)$$

Onde  $\sigma_c$ ,  $\sigma_{m,c}$ ,  $\sigma_w$  e  $\sigma_{m,w}$  é a tensão normal e o complemento para atingir a máxima tensão referente ao concreto e a madeira, respectivamente.

A tensão cisalhante máxima pode ser calculada pela Equação 11.

$$\tau_{w,max} = \frac{0,5 E_w h_w^2}{(EI)_{ef}} \cdot V \quad (11)$$

Onde  $V$  é a força cortante na seção transversal.

Já a força por conector é determinada a partir da Equação 12.

$$R_1 = \frac{y_c E_c A_c a_c S}{(EI)_{ef}} \cdot V \quad (12)$$

De acordo com Ceccotti (2002), caso o espaçamento entre os conectores varie, no cálculo de  $y_c$  o espaçamento efetivo,  $s_{ef}$ , deve ser considerado. Sendo este calculado por:



$$s_{ef} = 0,75s_{min} + 0,25s_{max} \quad (13)$$

com

$$s_{max} \leq 4s_{min} \quad (14)$$

Sendo  $s_{min}$  o espaçamento entre os conectores nas extremidades da viga e  $s_{max}$  o espaçamento na parte central.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos todos os procedimentos experimentais adotados para avaliar o comportamento mecânico de duas vigas mistas em madeira-concreto com sistema de ligação composto por parafusos autoatarraxantes. A geometria e os detalhes construtivos dos corpos de prova, bem como o processo de caracterização dos materiais envolvidos no estudo são apresentados nesta seção.

Todos os ensaios mencionados neste capítulo foram realizados no Laboratório de Sistemas Estruturais da UTFPR - *Campus* Campo Mourão-PR.

### 5.1 Caracterização da madeira

A madeira utilizada foi a da espécie *Apuleia leiocarpa*. A caracterização da resistência, bem como a rigidez, densidade e teor de umidade da madeira foram obtidos através dos ensaios descritos na ABNT NBR 7190-2: 2022. Quanto a classificação mecânica, seguiu-se as orientações da ABNT NBR 7190-3: 2022.

As dimensões e características dos corpos de prova utilizados para o ensaio de compressão paralela às fibras estão ilustrados na Tabela 6.

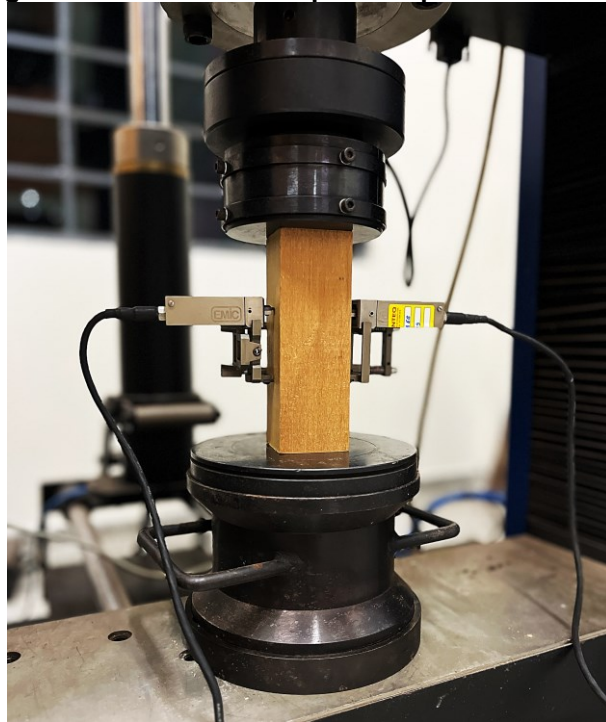
**Tabela 6 - Geometria dos corpos de prova**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>FACE 1 (mm)</b>	<b>FACE 2 (mm)</b>
<b>CP 1</b>	49,50	50,50
<b>CP 2</b>	50,50	49,50
<b>CP 3</b>	50,00	50,50
<b>CP 4</b>	49,50	50,20
<b>CP 5</b>	49,50	50,20
<b>CP 6</b>	50,50	50,20
<b>CP 7</b>	50,50	49,50

**Fonte: Autoria própria (2023)**

A Figura 14 apresenta um dos corpos de prova durante o ensaio de compressão paralela às fibras da madeira utilizando a máquina universal de ensaios, modelo EMIC DL-30000 e o transdutor de deslocamento.

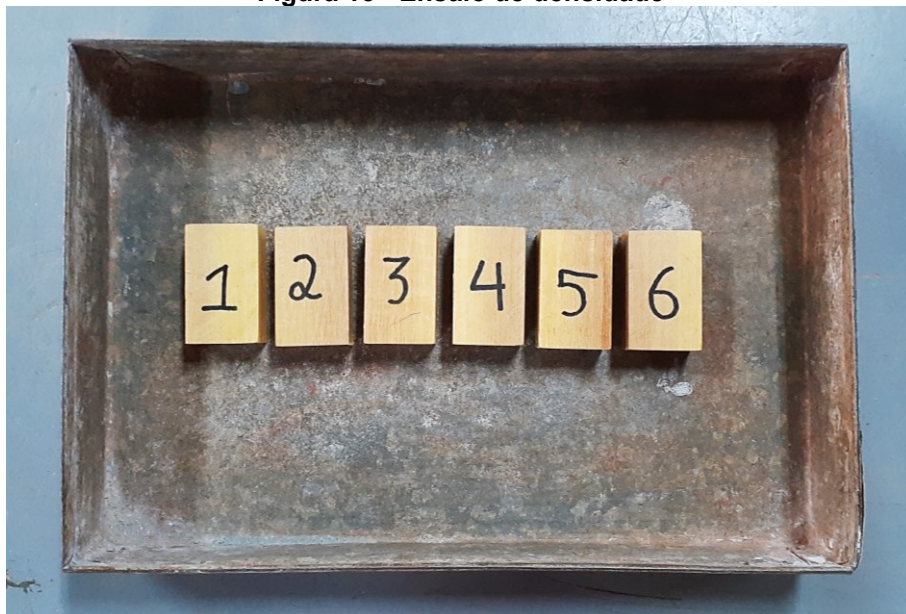
**Figura 14 - Ensaio de compressão paralela às fibras**



**Fonte: Aatoria própria (2023)**

Os corpos de prova do ensaio de densidade e teor de umidade da madeira foram levados para a estufa de secagem a uma temperatura de  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . (Figura 15). A Tabela 7 aponta a geometria de cada um deles.

**Figura 15 - Ensaio de densidade**



**Fonte: Aatoria própria (2023)**

Tabela 7 - Geometria dos corpos de prova testados

CORPO DE PROVA	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)	COMPRIMENTO (mm)
CP 1	49,50	29,50	20,20
CP 2	50,00	30,00	20,50
CP 3	50,00	30,00	20,50
CP 4	50,00	30,00	20,50
CP 5	49,50	30,00	21,00
CP 6	50,00	30,00	20,50

Fonte: Autoria própria (2023)

As duas peças de madeira foram aparelhadas na desengrossadeira para regularizar a superfície e padronizar as dimensões destas (Figura 16).

Figura 16 - Preparação das peças de madeira

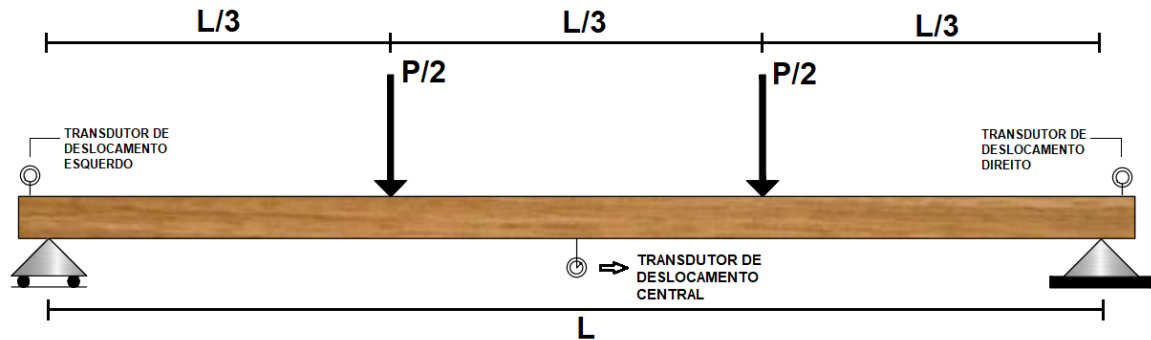


Fonte: Autoria própria (2023)

Para obter o valor do módulo de elasticidade à flexão, a alma de cada uma das vigas foi caracterizada por ensaio não destrutivo de flexão estática, limitando a flecha em  $L/200$ , respeitando o limite elástico do material.

Conforme a ASTM D-198: 2022, a configuração do carregamento consiste em aplicar carregamento concentrado nos terços do vão sobre a peça bi-apoiada, medindo a flecha no meio do vão a cada incremento de carregamento (Figura 17).

Figura 17 – Configuração do ensaio de flexão estática



Fonte: Autoria própria (2023)

A intensidade das forças aplicadas e os deslocamentos verticais correspondentes foram obtidos a partir da leitura dos transdutores de deslocamento, posicionados como ilustrado na Figura 17. Dispositivos de contraventamento também foram instalados para garantir a estabilidade das peças.

O módulo de elasticidade à flexão,  $E_M$ , de cada uma das almas foi determinado pela inclinação da reta secante a curva de força x deslocamento definida pelos pontos correspondentes a, aproximadamente, 10% e 40% da carga última.

Com os dados obtidos é possível calcular o valor do módulo de elasticidade à flexão através da Equação 15.

$$E_M = \frac{23L^3 \Delta_F}{1296I \Delta_\delta} \quad (15)$$

Onde:

L – vão

$\Delta_F$  – variação da força

I – momento de inércia da peça

$\Delta_\delta$  – variação da flecha

As Figuras 18 e 19 ilustram o ensaio de flexão estática realizado nas peças de madeira.

**Figura 18 - Ensaio de flexão estática**



Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 19 – Transdutores de deslocamento e contraentamento**



Fonte: Autoria própria (2023)

## 5.2 Caracterização do concreto

A determinação da composição granulométrica dos agregados utilizados foi realizada de acordo com a norma ABNT 17054: 2022.

O concreto empregado foi moldado *in loco* a partir da mistura adequada de cimento *portland* do tipo CP V-ARI, areia, brita e água (traço 1:1,4:1,6 e relação água/cimento de 0,5). A resistência a compressão foi verificada através do ensaio de compressão em 3 corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm, rompidos aos 14 dias de cura. Os corpos de prova foram moldados seguindo as orientações da ABNT NBR

5738: 2015 e rompidos de acordo com as recomendações da ABNT NBR 5739: 2018 (Figura 20).

**Figura 20 - Ensaio de compressão**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

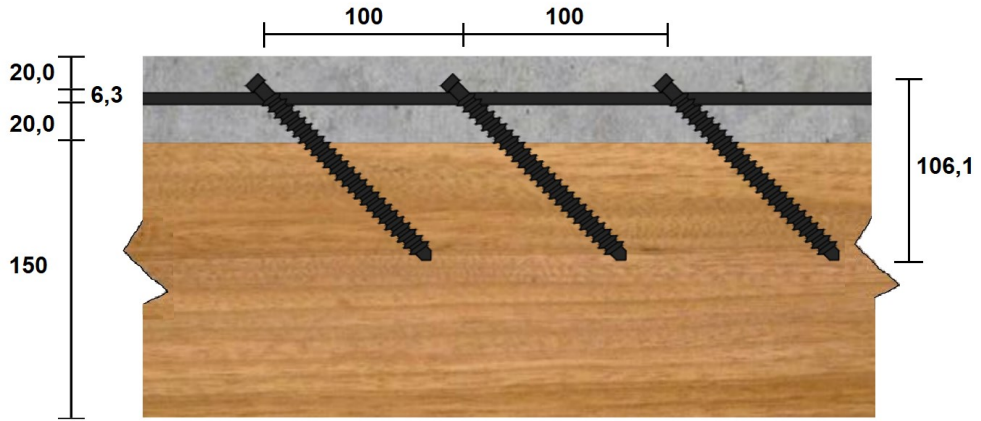
Para cálculo do módulo de elasticidade do concreto foi adotada a Equação 16.

$$E_c = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (16)$$

Onde  $\alpha_E$  é a constante que leva em consideração o tipo de agregado graúdo utilizado. Para este caso,  $\alpha_E = 1,2$ , dado que o tipo de agregado é basalto. O  $f_{ck}$  foi calculado utilizando o valor médio da resistência à compressão axial.

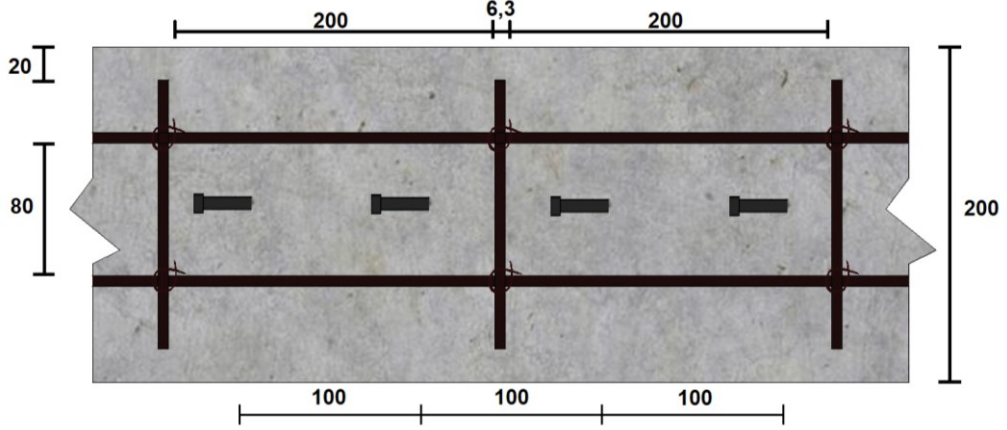
Para evitar fissuração, adotou-se uma armadura mínima na parte superior da mesa de concreto das duas vigas, sendo a viga 1 elaborada com conectores em linha e a viga 2 com conectores em zigue-zague (a 15 mm de distância do eixo longitudinal da viga). As barras de aço utilizadas foram de CA-50 com diâmetro nominal de 6,3 mm. A armadura foi disposta respeitando o cobrimento de 2 cm, atendendo os requisitos da norma ABNT NBR 6118: 2014 (Figura 21, Figura 22 e Figura 23).

**Figura 21 - Disposição de armadura (em mm)**



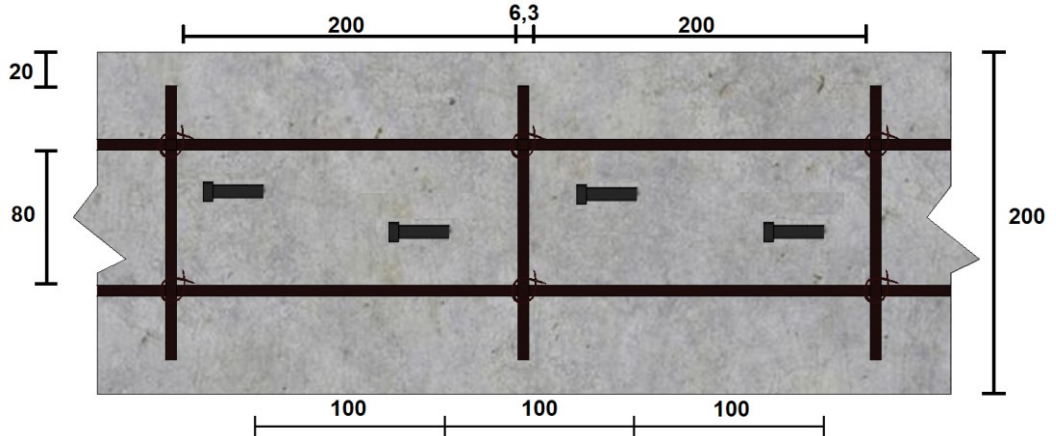
Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 22 – Detalhe das armaduras da viga 1 (em mm)**



Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 23 – Detalhe das armaduras da viga 2 (em mm)**



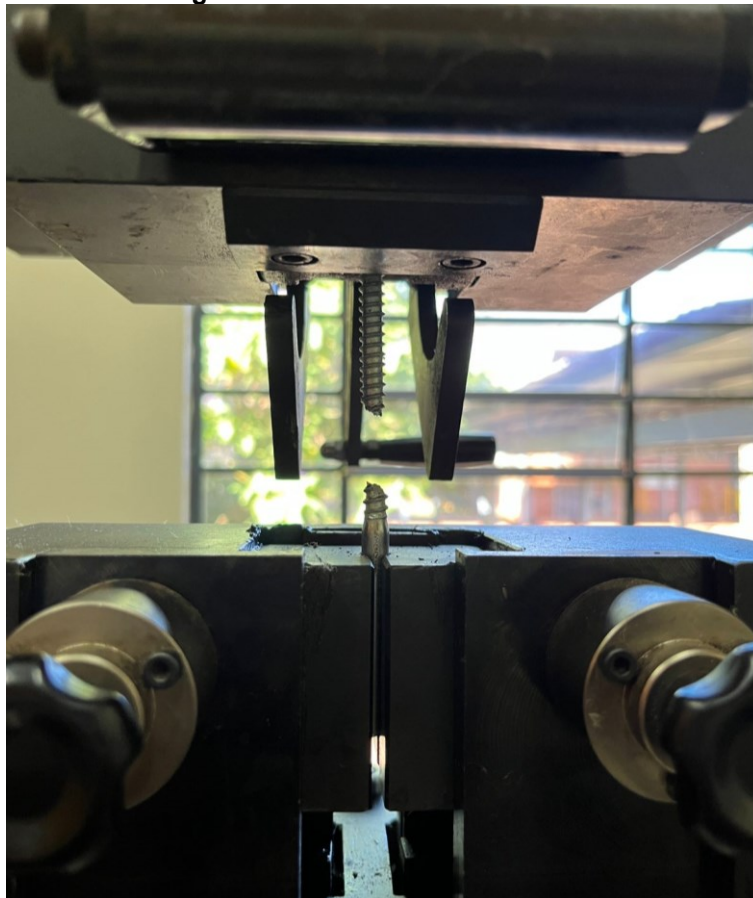
Fonte: Autoria própria (2023)



### 5.3 Conector

Para o sistema de ligação adotado foram realizados ensaios de tração simples em quatro parafusos autoatarraxantes para determinar as propriedades do material que o compõe, conforme a ABNT NBR ISO 6892-1: 2013. Os valores da tensão de escoamento e da resistência máxima à tração do aço dos parafusos foram determinados. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios, modelo EMIC DL-30000, como ilustra a Figura 24.

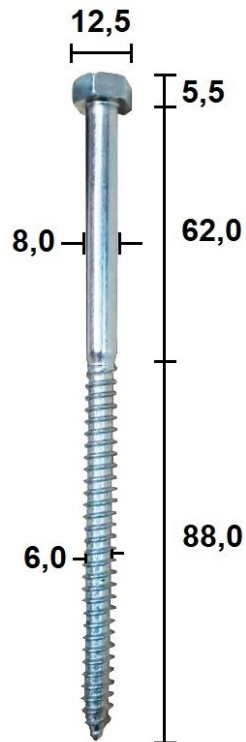
**Figura 24 - Ensaio dos conectores**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

As dimensões do conector utilizado no sistema de ligação estão descritas na Figura 25.

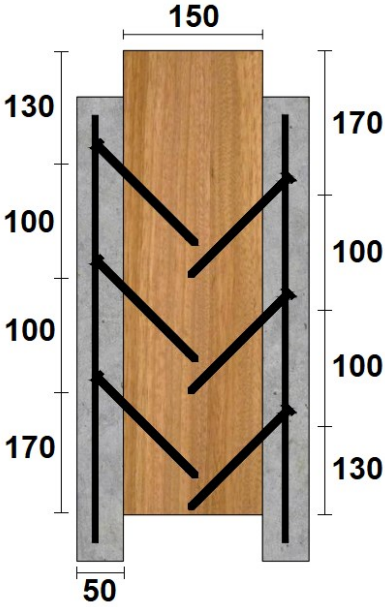
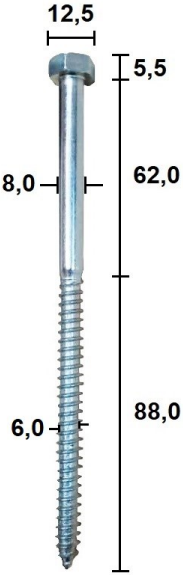
Figura 25 - Geometria do conector (em mm)



Fonte: Autoria própria (2023)

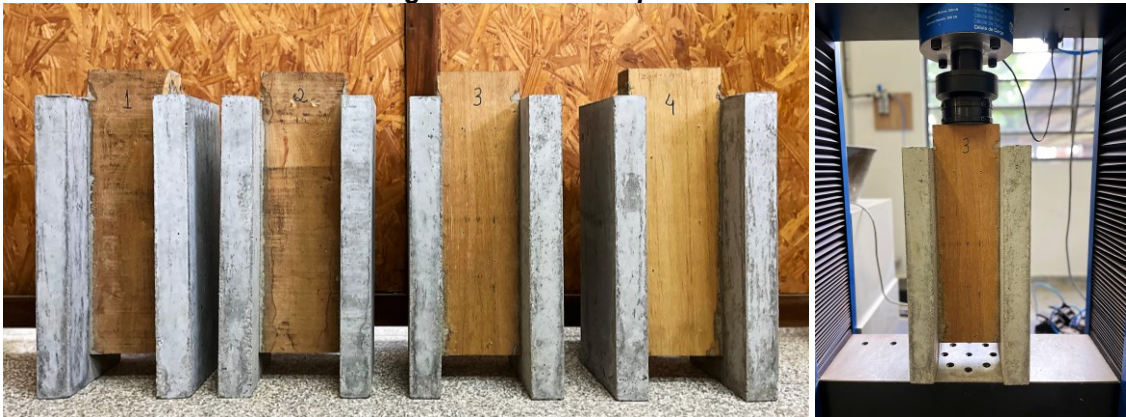
#### 5.4 Ensaio de ligações

No intuito de avaliar o módulo de deslizamento  $K_{ser}$  (*slip modulus*), foram realizados ensaios de ligações do tipo *push-out* (Figura 26), seguindo as recomendações do documento normativo CEN EN 26891: 1991. O sistema de ligação foi elaborado com parafusos autoatarraxantes a cada 100 mm. O diâmetro nominal do parafuso utilizado foi de 8 mm e o comprimento de 150 mm. Nos corpos de prova R1, R2 e R3, os parafusos foram instalados em linha. Já no corpo de prova R4, os parafusos foram instalados em zigue-zague, com 15 mm de distância do eixo longitudinal da madeira. A geometria dos quatro corpos de prova está ilustrada na Tabela 8.

Tabela 8 - Corpos de prova e conector metálico		
Corpo de prova	Geometria da seção (mm)	Conector a 45° (mm)
R1, R2, R3 e R4		

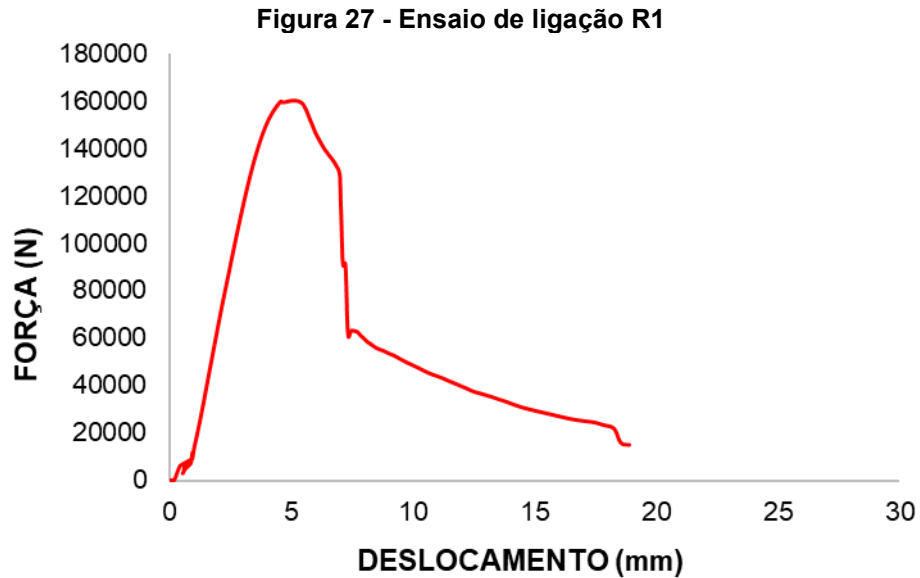
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 26 - Teste de *push-out*



Fonte: Autoria própria (2023)

O valor do módulo de deslizamento  $K_{ser}$  foi definido a partir da inclinação da reta secante à curva de força-deslizamento, definida pelos pontos  $(F_{10\%}, \delta_{10\%})$  e  $(F_{40\%}, \delta_{40\%})$  correspondentes a 10% e 40% da carga máxima suportada pelo sistema. A Figura 27 ilustra o comportamento típico de um corpo de prova utilizando este procedimento.



Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 9 descreve a geometria das vigas ensaiadas.

**Tabela 9 - Vigas ensaiadas**

Vigas	Seção transversal (mm)	Comprimento (mm)	Vão (mm)	Conector
VC1		4000	3800	Φ 8mm C/100 mm Em linha
VC2		4000	3800	Φ 8mm C/100 mm Em zig-zague

Fonte: Autoria própria (2023)

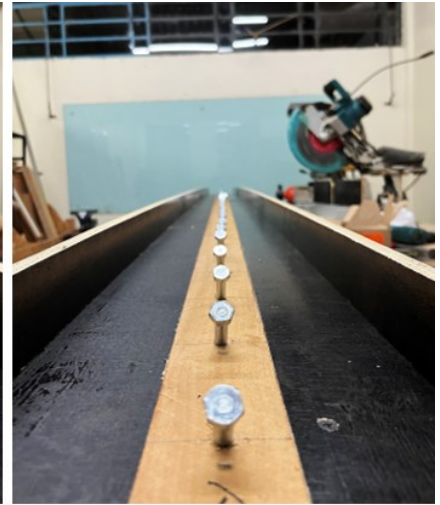
A pré-furação das vigas foi feita com broca de diâmetro de 6 mm, para o diâmetro efetivo, e de 6,5 mm, para o diâmetro do fuste (Figura 28).

**Figura 28 - Montagem das vigas**

a) Instalação dos parafusos



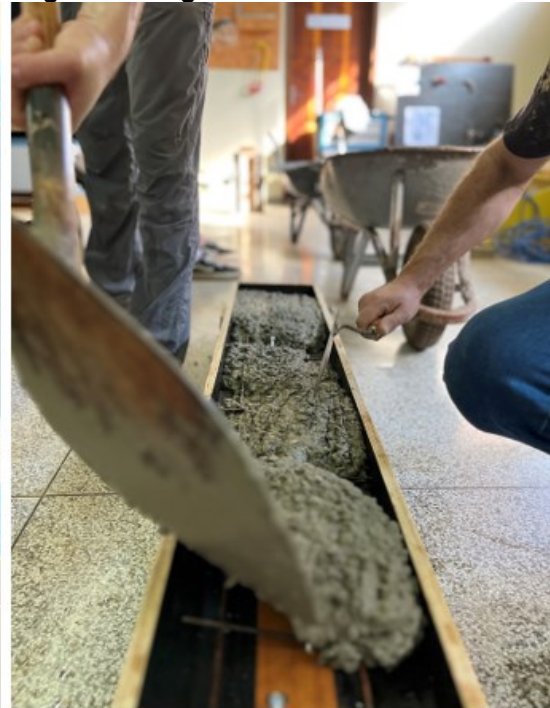
b) Parafusos em zigue-zague instalados



c) Parafusos em linha instalados

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Após instalar os conectores e montar as formas, as vigas foram concretadas. A Figura 29 ilustra as etapas de preparo e concretagem das vigas.

**Figura 29 - Concretagem das vigas****a) Preparando a viga para ser concretada****b) Concretagem da viga****c) Sarrafeamento e acabamento****d) Viga finalizada**

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Após os 14 dias de cura do concreto foi realizado o ensaio de flexão estática nas vigas para avaliar o comportamento do sistema de ligação, de acordo com a ASTM D-198: 2022, com carregamento correspondente a 10% e 40% da carga

máxima ( $F_u$ ). A configuração do ensaio foi alterada para determinação da carga máxima e as vigas foram conduzidas a ruptura.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios experimentais, bem como a comparação do comportamento das vigas ensaiadas com o comportamento previsto na norma CEN EN 1994-1: 2004, CEN EN 1995-1: 2004 e com outros trabalhos da literatura.

### 6.1 Caracterização da madeira

A Tabela 10 apresenta os valores do módulo de elasticidade ( $E_{c0}$ ) e tensão de compressão ( $f_{c0}$ ) obtidos através do ensaio de compressão paralela às fibras da madeira.

**Tabela 10 - Ensaio de compressão paralela às fibras**

CORPO DE PROVA	$E_{c0}$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)
CP 1	18599	77,83
CP 2	19632	75,41
CP 3	18743	80,54
CP 4	19071	86,06
CP 5	16881	65,75
MÉDIA	18585	77,12
DESVIO PADRÃO	923	6,70
COEF. VARIAÇÃO (%)	4,97	8,69

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 11 apresenta os resultados do teor de umidade de cada corpo de prova ensaiado.

**Tabela 11 - Resultados dos ensaios de teor de umidade**

CP	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Teor de umidade (%)
1	28,829	26,495	8,81
2	28,976	26,337	10,02
3	28,110	25,920	8,45
4	28,661	26,085	9,88
5	28,644	26,089	9,79
6	28,531	25,944	9,97
MÉDIA	28,625	26,145	9,49
DESVIO PADRÃO	0,27	0,21	0,62
COEF. DE VARIAÇÃO (%)	0,95	0,79	6,52

Fonte: Autoria própria (2023)



Os valores de densidade ( $\rho$ ) de cada corpo de prova estão descritos na Tabela 12.

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
CP 1	872,63
CP 2	841,30
CP 3	816,26
CP 4	832,52
CP 5	820,11
CP 6	828,42
MÉDIA	835,21
DESVIO PADRÃO	18,61
COEF. VARIAÇÃO (%)	2,23

**Fonte: Autoria própria (2023)**

O módulo de elasticidade obtido através do ensaio não destrutivo de flexão estática das peças de madeira é utilizado para avaliar o comportamento das vigas compostas. A Tabela 13 aponta os resultados preliminares dos ensaios de flexão estática realizado em cada uma das peças com o carregamento conduzido até L/200 (19 mm), não excedendo o limite elástico do material.

<b>ALMA 01</b>						
<b>DIMENSÕES (mm)</b>	<b>F (N)</b>	<b>T.D CENTRAL (mm)</b>	<b>T.D ESQUERDO (mm)</b>	<b>T.D DIREITO (mm)</b>	<b><math>\Delta</math> (mm)</b>	<b><math>E_M</math> (MPa)</b>
57 x 152	660	2,080	0,066	0,034	2,030	16086
	5600	20,200	0,334	0,150	19,958	
<b>ALMA 02</b>						
<b>DIMENSÕES (mm)</b>	<b>F (N)</b>	<b>T.D CENTRAL (mm)</b>	<b>T.D ESQUERDO (mm)</b>	<b>T.D DIREITO (mm)</b>	<b><math>\Delta</math> (mm)</b>	<b><math>E_M</math> (MPa)</b>
58 x 153	420	2,100	0,455	0,082	1,832	16214
	5200	20,000	1,025	0,204	19,386	

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Onde  $\Delta$  é a variação do deslocamento no meio do vão, levando em consideração a variação de deslocamento nas extremidades das peças. Enquanto T.D indica os valores dos transdutores de deslocamento central, esquerdo e direito, respectivamente.

## 6.2 Caracterização do concreto

A Tabela 14 aponta a classificação do agregado miúdo seco, com 500 g de amostra coletada e, na Tabela 15, a classificação do agregado graúdo seco, com 1000 g de amostra coletada.

**Tabela 14 - Classificação do agregado miúdo**

PENEIRA	MALHA (mm)	MASSA (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA	MÓDULO DE FINURA	TIPO
1	4,75	0,00	0,00	0,00		
2	2,36	1,09	0,22	0,22		
3	1,18	7,68	1,54	1,76		
4	0,60	73,78	14,77	16,53	1,93	<b>FINA</b>
5	0,30	301,36	60,34	76,87		
6	0,15	104,71	20,97	97,84		
<b>FUNDO</b>	-	10,80	2,16	100,00		
<b>TOTAL</b>	-	499,42	100,00	100,00		

Fonte: Autoria própria (2023)

**Tabela 15 - Classificação do agregado graúdo**

PENEIRA	MALHA (mm)	MASSA (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA	MÓDULO DE FINURA	TIPO
1	76	0,00	0,00	0,00		
2	38	0,00	0,00	0,00		
3	19	0,00	0,00	0,00		
4	9,5	78,85	7,89	7,89	1,05	<b>Brita 1</b>
5	4,75	895,23	89,53	97,41		
<b>FUNDO</b>	-	25,87	2,59	100,00		
<b>TOTAL</b>	-	999,95	100,00	100,00		

Fonte: Autoria própria (2023)

Os valores de resistência à compressão dos corpos de prova obtidos estão dispostos na Tabela 16.

**Tabela 16 - Ensaio de compressão**

CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	$f_{c,14}$ (MPa)
1	100,15	41,21
2	100,00	42,95
3	100,00	42,63
<b>MÉDIA</b>	-	42,26
<b>DESVIO PADRÃO</b>	-	0,76
<b>COEF. VARIAÇÃO (%)</b>	-	1,79

Fonte: Autoria própria (2023)

### 6.3 Conector

Na Tabela 17 estão indicados os resultados de resistência última do aço dos parafusos determinados por ensaio de tração simples.

**Tabela 17 - Resultado dos ensaios de tração nos parafusos**

CP	$f_u$ (MPa)
1	765,75
2	766,53
3	772,21
4	772,21
MÉDIA	769
DESVIO PADRÃO	3,05
COEF. VARIAÇÃO (%)	0,40

Fonte: Autoria própria (2023)

O modo de ruptura para os quatro corpos de prova foi semelhante. Este ocorreu como ilustra a Figura 30.

**Figura 30 - Modo de ruptura dos parafusos**



Fonte: Autoria própria (2023)

### 6.4 Ensaio de ligações

Quanto aos corpos de prova do ensaio de ligação do tipo *push-out*, o primeiro corpo de prova ensaiado, R1, apresentou um modo de ruptura diferente dos outros três corpos de prova ensaiados, onde os parafusos falharam antes do concreto (Figura 31 e Figura 32).

**Figura 31 - Corpo de prova R1**

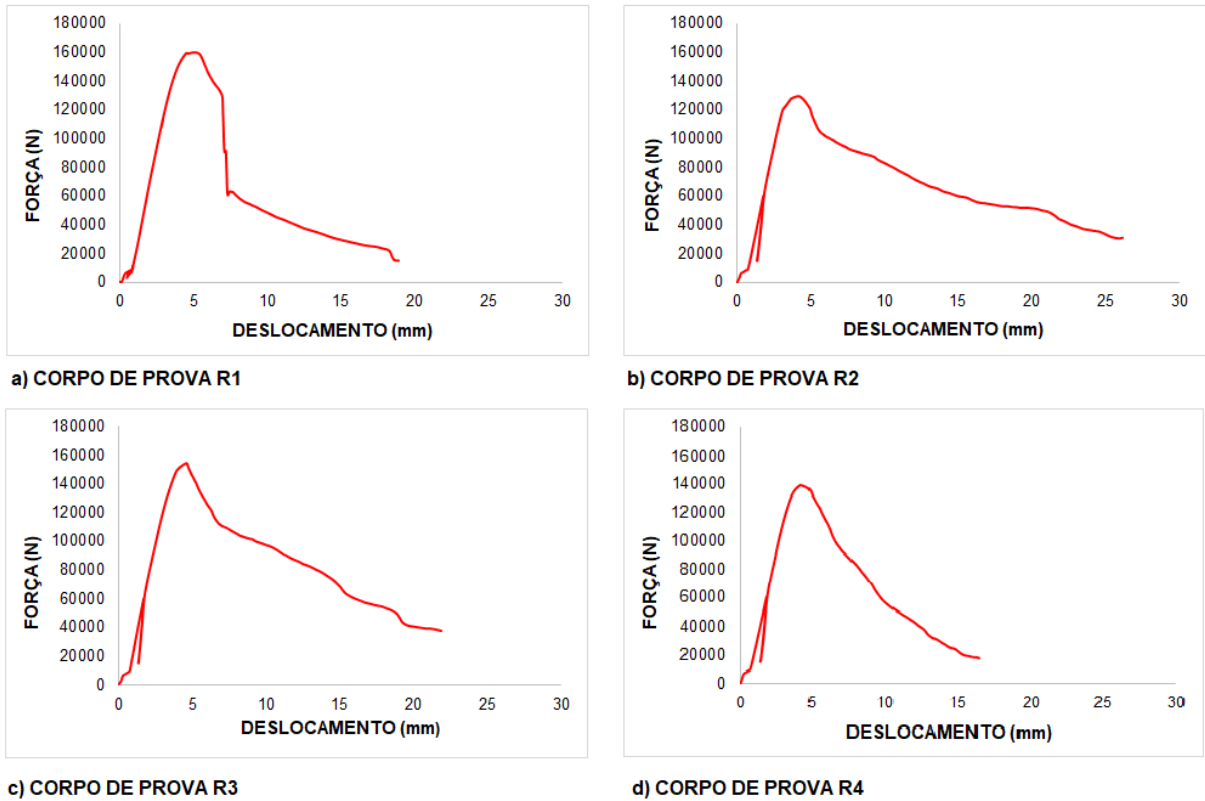
Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 32 - Corpos de prova R2, R3 e R4**

Fonte: Autoria própria (2023)

Através da Figura 33 é possível observar o comportamento de cada corpo de prova submetido ao ensaio do tipo *push-out*.

Figura 33 - Comportamento dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Tabela 18 encontram-se registradas as forças de ruptura de cada corpo de prova,  $F_u$ , e os módulos de deslizamento,  $K_{ser}$ , correspondentes aos sistemas de ligações propostos nos ensaios do tipo *push-out*.

Tabela 18 – Resultados obtidos dos ensaios de ligações

CORPO DE PROVA	$F_u$ (N)	$K_{ser}$ (N/mm)
R1	160150	52330
R2	129340	92014
R3	154120	107350
R4	138380	93952
MÉDIA	145498	86412
DESVIO PADRÃO	12255	20544
COEF. VARIAÇÃO (%)	8,4	23,78

Fonte: Autoria própria (2023)

Miotto (2009) realizou ensaios do tipo *push-out* em seis corpos de prova com barras de aço com diâmetro nominal de 8 mm e seis corpos de prova com barras de aço com diâmetro nominal de 10 mm. Os valores médios de módulo de deslizamento ( $K_{ser}$ ) e força de ruptura ( $F_u$ ) estão descritos na Tabela 19.

**Tabela 19 – Valores médios dos ensaios de ligações**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b><math>F_u</math> (N)</b>	<b><math>K_{ser}</math> (N/mm)</b>
<b>BARRAS DE 8 MM</b>	131000	142936
<b>BARRAS DE 10 MM</b>	135300	112998

Fonte: Adaptado de Miotto (2009)

Em relação aos corpos de prova com barras de 8 mm de diâmetro, o presente estudo apresentou um valor 40% menor para o módulo de deslizamento ( $K_{ser}$ ) e 10% maior para a força de ruptura ( $F_u$ ). Já para os corpos de prova com barras de 10 mm de diâmetro, o resultado obtido foi 24% menor para o módulo de deslizamento ( $K_{ser}$ ) e 7% maior para a força de ruptura ( $F_u$ ).

Appavuravther, Vandoren e Henriques (2021) avaliaram 18 corpos de prova com conectores trabalhando à compressão, instalados a 90° e 45°. O valor médio de módulo de deslizamento para os corpos de prova com parafusos de 8 mm de diâmetro, com comprimento de 160 mm, instalados a 45° foi de 28930 N/mm, com força de ruptura igual a 23340 N. Para os corpos de prova com parafusos de 8 mm de diâmetro, com comprimento de 160 mm, instalados a 90°, o valor médio de módulo de deslizamento foi de 6850 N/mm e força de ruptura igual a 44060 N. Quando comparados os valores apresentados na Tabela 18, para os corpos de prova com parafusos de 8 mm de diâmetro, com comprimento de 160 mm, instalados a 45°, o valor médio é 67% menor para o módulo de deslizamento e 83% menor para a força de ruptura. Já para os parafusos de 8 mm de diâmetro, com comprimento de 160 mm, instalados a 90°, o valor médio é 92% menor para o módulo de deslizamento e 70% menor para a força de ruptura.

Em Djoubissie *et al.* (2018) dois tipos de ligações foram estudadas, sendo 3 corpos de prova com barra de aço roscável com diâmetro nominal de 10 mm e 3 corpos de prova com barra de aço roscável com diâmetro nominal de 12 mm. Em ambos os casos, os conectores possuem comprimento de 120 mm e foram instalados inclinados a 120°. A Tabela 20 aponta os valores médios obtidos.

**Tabela 20 – Resultado dos ensaios de ligações**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b><math>F_u</math> (N)</b>	<b><math>K_{ser}</math> (N/mm)</b>
<b>S120-HA10</b>	13000	15500
<b>S120-HA12</b>	18300	15400

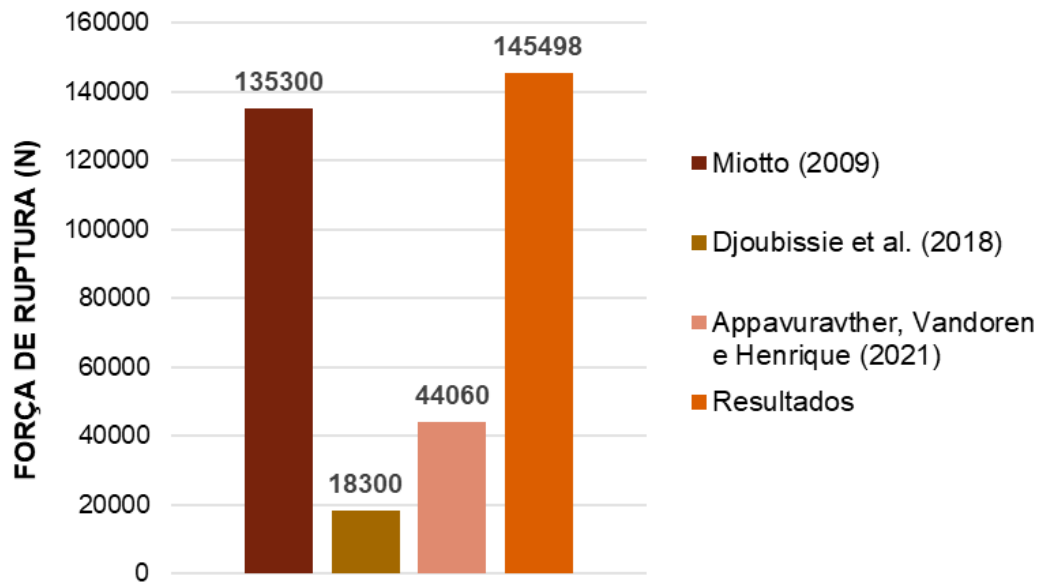
Fonte: Adaptado de Djoubissie *et al.*, (2018)

Ao comparar os valores médios do primeiro parafuso listado na Tabela 20 com os valores médios na Tabela 18, nota-se que a força de ruptura da segunda tabela

mencionada apresenta um valor 91% maior do que a força de ruptura obtida pelos autores e, também, valor de módulo de deslizamento 82% maior. Já para o segundo parafuso, a força de ruptura é 87% maior e o módulo de deslizamento 82% maior.

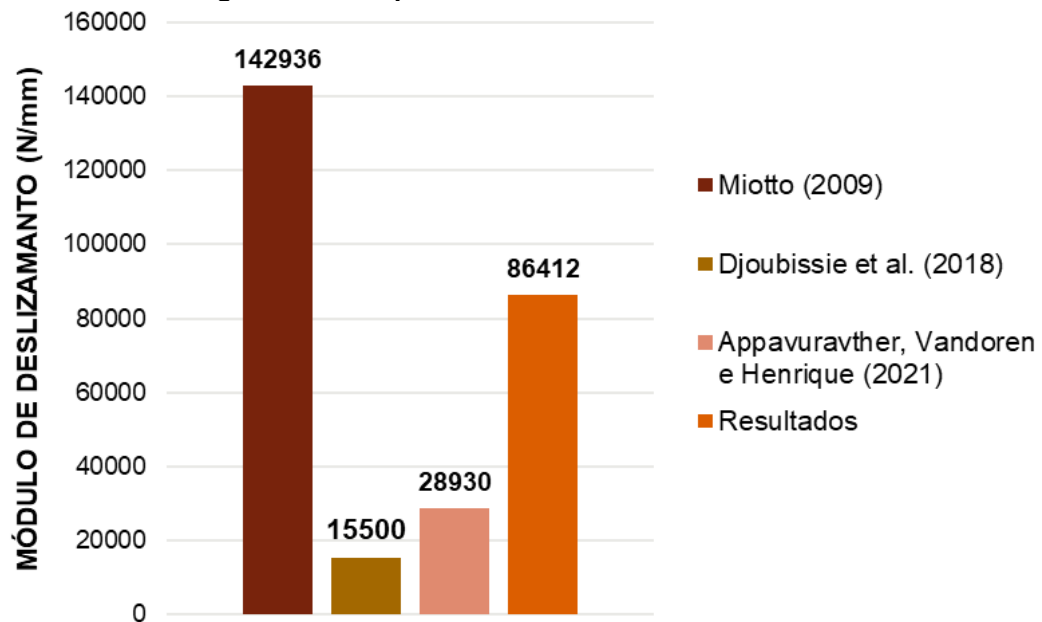
A Figura 34 aponta a comparação entre os maiores valores médios de força de ruptura e a Figura 35 os maiores valores médios de módulo de deslizamento obtidos em cada um dos três trabalhos mencionados (Miotto, 2009; Appavuravther; Vandoren; Henriques, 2021; Djoubissie *et al.*, 2018), em relação ao presente estudo.

**Figura 34 - Comparativo da força de ruptura**



Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 35 - Comparativo do módulo de deslizamento**



Fonte: Autoria própria (2023)

Após o ensaio de flexão estática nas vigas compostas, a configuração de ensaio foi alterada e estas foram conduzidas a ruptura. A viga com conectores instalados em linha atingiu o modo de falha com carga máxima de 50250 N. Para este caso, a madeira falhou antes do concreto (Figura 36).

**Figura 36 - Rompimento da viga 1**



Fonte: Autoria própria (2023)

A viga em que os conectores foram instalados em zigue-zague apresentou comportamento mais rígido, quando comparada à viga 1. Esta alcançou a carga máxima de 53780 N, onde a mesa de concreto falhou antes da alma de madeira (Figura 37).

**Figura 37 - Rompimento da viga 2**



Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 21 apresenta a comparação entre a rigidez à flexão experimental,  $(EI)_{exp}$ , sendo este o valor obtido através dos ensaios de flexão estática das vigas, e a rigidez à flexão total,  $(EI)_{total}$ , que representa o valor considerando a composição total com rigidez infinita. Os valores de rigidez à flexão calculados de acordo com a norma CEN EN 1995-1: 2004 são representados por  $(EI)_{EC5}$ . Os valores de  $\alpha_{exp}$  e



$\alpha_{EC5}$  são os valores que representam a diferença de  $(EI)_{exp}$  e  $(EI)_{EC5}$  em relação a  $(EI)_{total}$ . Já a eficiência das vigas foi obtida pela razão entre  $(EI)_{exp}$  e  $(EI)_{total}$ .

**Tabela 21 - Rigidez à flexão das vigas**

VIGA	$(EI)_{total}$ (N.mm <sup>2</sup> )	$(EI)_{exp}$ (N.mm <sup>2</sup> )	$(EI)_{EC5}$ (N.mm <sup>2</sup> )	$\alpha_{exp}$	$\alpha_{EC5}$	DIFERENÇA (%)
V1	1,496E+12	1,118E+12	1,190E+12	0,75	0,80	6,3
V2	1,572E+12	1,262E+12	1,223E+12	0,80	0,78	2,5

Fonte: Autoria própria (2023)

Miotto e Dias (2015) avaliaram a eficiência de quatro vigas mistas em MLC-concreto, sendo duas vigas com a parte inferior da alma de madeira reforçada com fibra de vidro e duas vigas sem reforço. O valor médio da eficiência das vigas reforçadas foi de 0,61 e, das vigas não reforçadas, foi de 0,59. Enquanto que, para a viga 1 apresentada na Tabela 21, a eficiência obtida foi de 0,75 e, para a viga 2, de 0,80.

### 6.5 Ensaio de flexão estática das vigas compostas

Os resultados dos ensaios realizados nas duas vigas compostas estão expressos nas Tabelas 22 e 23. Na Figura 38, o item a) corresponde ao comportamento da viga 1 com conectores instalados em linha reta, enquanto o item b) corresponde ao comportamento da viga 2 com conectores instalados em ziguezague.

**Tabela 22 - Ensaio de flexão estática da viga 1**

P (N)	T.D ESQUERDO (mm)	T.D CENTRAL (mm)	T.D DIREITO (mm)	$\Delta$ (mm)
1720	0,052	2,000	0,078	1,935
3980	0,198	4,000	0,190	3,806
6320	0,266	6,000	0,243	5,746
8730	0,300	8,000	0,300	7,700
11000	0,390	10,000	0,321	9,645
13090	0,500	12,000	0,360	11,570
15140	0,638	14,000	0,469	13,447
17200	0,762	16,000	0,590	15,324
19250	0,864	18,000	0,721	17,208
50250	<b>RUPTURA</b>			

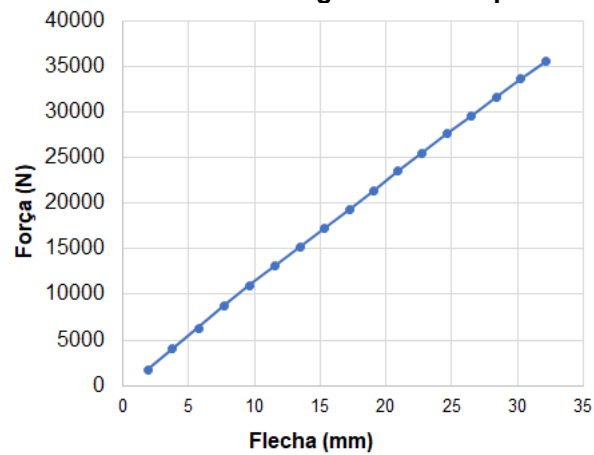
Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 23 - Ensaio de flexão estática da viga 2

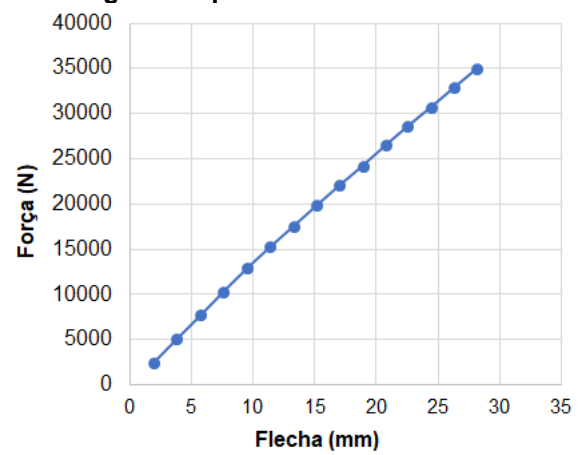
P (N)	T.D ESQUERDO (mm)	T.D CENTRAL (mm)	T.D DIREITO (mm)	$\Delta$ (mm)
2500	0,102	2,000	0,102	1,898
5120	0,200	4,000	0,209	3,796
7710	0,295	6,000	0,33	5,688
10340	0,383	8,000	0,465	7,576
12910	0,487	10,000	0,552	9,481
15300	0,581	12,000	0,663	11,378
17580	0,680	14,000	0,777	13,272
19860	0,787	16,000	0,926	15,144
22090	0,905	18,000	1,067	17,014
53780	<b>RUPTURA</b>			

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 38 - Comportamento das vigas compostas



a) COMPORTAMENTO DA VIGA 1



b) COMPORTAMENTO DA VIGA 2

Fonte: Autoria própria (2023)

## 7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- Comprovou-se a influência da rigidez das ligações no comportamento das vigas compostas em madeira-concreto com conectores instalados a 45°.
- Os resultados apontaram que a força de ruptura dos parafusos autoatarraxantes inclinados a 45° foi superior a outros conectores estudados. Além disso, comprovou-se que parafusos inclinados a 45° trabalhando à tração apresentam resultados superiores a parafusos instalados a 45° trabalhando à compressão.
- A viga composta com parafusos instalados em linha apresentou valor de rigidez próximo e inferior ao da norma CEN EN 1995-1, com diferença de 6,3%. Já a viga com parafusos instalados em zigue-zague apresentou um valor próximo e superior ao da norma CEN EN 1995-1, com diferença de 2,5%.
- A viga composta com parafusos instalados em linha apresentou modo de ruptura onde a alma de madeira rompeu antes da mesa de concreto, enquanto a viga com parafusos instalados em zigue-zague obteve modo de ruptura onde a mesa de concreto falhou antes da alma de madeira.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos – Ensaio de Tração – Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-2**: Projeto de estruturas de madeira: Método de ensaios para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeiras. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-3**: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 198**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken, 2022.
- APPAVURAVTHER, E.; VANDOREN, B.; HENRIQUES, J. Behaviour of screw connections in timber-concrete composites using low strength lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 286, 2021. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122973. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821007339#bi005>. Acesso em: 1 maio. 2023.
- CECCOTTI, A. Composite concrete-timber structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 264–275, 2002. DOI 10.1002/pse.126. Disponível em: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=8948d64e-f463-3ca8-9780-79ab65a9fdae>. Acesso em: 1 mai. 2023.
- CECCOTTI, A. Timber-concrete composite structures. *In*: TIMBER ENGINEERING - STRUCTURAL TIMBER EDUCATION PROGRAMME. BLASS, H. J., AUNE, P., CHOO, B.S. *et al.*, 1., 1995, Almere: Centrum Hout, 1995. p. 1-12.
- DI NINO, S.; GREGORI, A.; FRAGIACOMO, M. Experimental and numerical investigations on timber-concrete connections with inclined screws. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 209, 2020. DOI 10.1016/j.engstruct.2019.109993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619309691>. Acesso em: 1 maio. 2023.

DJOUBISSIE, D. D. *et al.* Experimental study of the mechanical behavior of timber-concrete shear connections with threaded reinforcing bars. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 172, p. 997–1010, 2018. DOI 10.1016/j.engstruct.2018.06.084. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014102961734004X>. Acesso em: 23 abr. 2023.

DU, H. *et al.* Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of glulam-concrete composite beams with interlayer. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 38, 2021. DOI 10.1016/j.jobbe.2021.102193. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221000498>. Acesso em: 23 abr. 2023.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 1994-1**: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 1995-1**: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 26891**: Timber structures – Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determinations of strength and deformation. Brussels, 1991.

GÓES, J. L. N. Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I. **Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP**, [s. l.], 2015. Disponível em: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=0715557d-deb4-3a4e-be97-a8ec567a3ad2>. Acesso em: 4 abr. 2023.

LING, Z. *et al.* Shear performance of assembled shear connectors for timber–concrete composite beams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 329, 2022. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.127158. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182200839X>. Acesso em: 30 abr. 2023.

MARTÍN-GUTIÉRREZ, E. *et al.* Flexural behaviour of a new timber-concrete composite structural flooring system. Full scale testing. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 64, 2023. DOI 10.1016/j.jobbe.2022.105606. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S2352710222016126&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 23 abr. 2023.

MIOTTO, J. L. Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro. **Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP**, [s. l.], 2015. Disponível em: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=2ada9d2b-d4a6-3fe5-828b-d9acb9a37d1a>. Acesso em: 23 abr. 2023.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Structural efficiency of full-scale timber–concrete composite beams strengthened with fiberglass reinforced polymer. **Composite Structures**, [s. l.], v. 128, p. 145–154, 2015. DOI 10.1016/j.compstruct.2015.03.054. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315002275>. Acesso em: 23 abr. 2023.

MIRDAD, M. A. H.; CHUI, Y. H. Load-slip performance of Mass Timber PanelConcrete (MTPC) composite connection with Self-tapping screws and insulation layer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 213, p. 696–708, 2019. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.117. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819310001#ab005>. Acesso em: 4 maio. 2023.

OTERO-CHANS, D. *et al.* Experimental analysis of glued-in steel plates used as shear connectors in Timber-Concrete-Composites. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 170, p. 1–10, 2018. DOI 10.1016/j.engstruct.2018.05.062. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S0141029617340117&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 23 abr. 2023.

PIGOZZO, J, C. Estudos e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes. **Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP**, [s. l.], 2004. Disponível em: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=0f063f04-4cd0-3cab-9ceb-25c925034514>. Acesso em: 23 abr. 2023.

SEBASTIAN, W. M. *et al.* Experimental evidence for effective flexural-only stiffnesses to account for nonlinear flexural-slip behaviour of timber-concrete composite sections. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 149, p. 481–496, 2017. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.082. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181730733X>. Acesso em: 1 maio. 2023.

SIDDIKA, A. *et al.* Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art review. **Engineering Failure Analysis**, [s. l.], v. 130, 2021. DOI 10.1016/j.engfailanal.2021.105766. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S1350630721006270&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 23 abr. 2023.

SORIANO, J. Estruturas mistas em concreto e em madeira: análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil. **Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)**, [s. l.], 2001. Disponível em: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=ec504cc0-4acc-37a9-9b6f-0c1242458ec8>. Acesso em: 4 jun. 2023.

YEOH, D.; FRAGIACOMO, M.; DEAM, B. Experimental behaviour of LVL– concrete composite floor beams at strength limit state. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 2697–2707, 2011. DOI 10.1016/j.engstruct.2011.05.021. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S0141029611002215&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 1 maio. 2023.

ZHU, W. *et al.* Experimental investigation on innovative connections for timber–concrete composite systems. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 207, p. 345–356, 2019. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.079. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819303721>. Acesso em: 30 abr. 2023.