

## **Influência da troca da densidade aparente entre a alma e a mesa de uma viga em T de madeira invertida no desempenho mecânico**

### **Influence of the exchange of the apparent density between the web and the flange of an inverted wooden T-beam design on the mechanical performance**

DOI:10.34115/basrv6n6-014

Recebimento dos originais: 04/11/2022

Aceitação para publicação: 12/12/2022

#### **Pedro Paulo de Andrade Silva**

Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-000, Açailândia - MA

E-mail: pedrosilva.2017081581@uemasul.edu.br

#### **Sabrina de Oliveira Rodrigues**

Bacharelada em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-000, Açailândia - MA

E-mail: sabrinarodrigues.201762905@uemasul.edu.br

#### **Viviane Carvalho de Moraes**

Bacharelada em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-000, Açailândia - MA

E-mail: vivianemoraes.2017082767@uemasul.edu.br

#### **Juliana Carvalho de Lima**

Bacharelada em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-000, Açailândia - MA

E-mail: julianalima.2017081447@uemasul.edu.br

#### **Ludson Lima Bandeira**

Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-000, Açailândia - MA

E-mail: ludsonbandeira.201763170@uemasul.edu.br

### **Carlos Henrique Carneiro Castro**

Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-000, Açailândia - MA

E-mail: carloscastro.201763143@uemasul.edu.br

### **Clesio de Oliveira Rodrigues**

Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-000, Açailândia - MA

E-mail: clesiorodrigues.201763072@uemasul.edu.br

### **Witor Carvalho Bomjardim**

Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-000, Açailândia - MA

E-mail: witorbomjardim.2017082794@uemasul.edu.br

## **RESUMO**

Até meados de 1980, a forma de T invertido manteve-se como uma das seções transversais menos investigadas. As vigas T invertidas possuem inúmeras vantagens, entretanto elas também representam sérios desafios no mecanismo de transferência de carga, nessas vigas a teoria da elasticidade segundo a qual “estruturas planas permanecem planas” torna-se questionável devido a distorções geométricas induzidas pela carga. As seções de peças de madeira disponíveis comercialmente possuem dimensões limitadas, podendo esta limitação ser contornada com a utilização de peças compostas, que atuam como um único elemento ao serem solicitadas. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho mecânico de vigas compostas por 2 espécies de madeira (sucupira e angelim ferro) coladas entre si. As vigas em seção T foram submetidas ao ensaio de flexão em 1 ponto de forma biapoçada.

**Palavras-chave:** angelim ferro, madeira, sucupira, vigas T.

## **ABSTRACT**

Until the mid-1980s, the inverted T-shape remained one of the least investigated cross-sections. Inverted T-beams have numerous advantages, however they also pose serious challenges in the load transfer mechanism, in these beams the theory of elasticity according to which “flat structures remain flat” becomes questionable due to load-induced geometric distortions. The sections of commercially available wooden pieces have limited dimensions, and this limitation can be overcome with the use of composite pieces, which act as a single element when requested. The objective of this work is to evaluate the mechanical performance of beams composed of 2 wood species (sucupira and angelim ferro) glued together. The T-section beams were submitted to the 1-point bending test in a bi-supported manner.

**Keywords:** angelim ferro, wood, sucupira, T beams.

## 1 INTRODUÇÃO

As vigas T invertidas possuem inúmeras vantagens, entretanto elas também representam sérios desafios no mecanismo de transferência de carga, nessas vigas a teoria da elasticidade segundo a qual “estruturas planas permanecem planas” torna-se questionável devido a distorções geométricas induzidas pela carga (GARBER et al., 2017).

Segundo Galal e Sekar (2008), em vigas retangulares, os modos de ruptura podem ser classificados conforme os esforços de força normal, força cortante, momento torsor e momento fletor, entretanto, em vigas de T invertido, são mais complexos os modos, necessitando de um projeto mais rigoroso e específico que possibilita o dimensionamento de regiões com descontinuidade.

A utilização da madeira na construção civil necessita do estudo das suas características físicas e mecânicas (GONÇALVES, 2009), pois estas propriedades podem influenciar diretamente na sua resistência e desempenho. Segundo Correia (2009), a madeira é um material que sendo utilizada em sistemas estruturais suporta com eficácia os esforços de tração e compressão, apresentando conseqüentemente bom desempenho à flexão. Dentre as características físicas da madeira cujo conhecimento é fundamental para a sua utilização como material de construção, destaca-se a densidade aparente, sendo está determinada para uma umidade padrão de referência de 12%, utilizada nos cálculos de estruturas e classificação da madeira (VALLE, 2015).

As seções de peças de madeira disponíveis comercialmente possuem dimensões limitadas, podendo esta limitação ser contornada com a utilização de peças compostas, que atuam como um único elemento ao serem solicitadas (VALLE, 2015). A ampla utilização das de vigas de madeira com seção composta vem ganhando espaço na construção civil, sendo suas principais vantagens a rigidez e resistência mecânica elevadas (RODRIGUES *et al*, 2022). A sua aplicação veio facilitar o desenvolvimento de estruturas complexas e que necessitam grandes dimensões através da união de peças com dimensões menores e disponíveis no mercado

Os critérios para verificar os estados limites são os mesmos para o elemento maciço, mas a rigidez do elemento é reduzida devido à deformidade das ligações entre as peças que constituem a seção transversal (ALVIN, 2009).

Para compreender o comportamento de seções compostas, faz-se necessário o entendimento das ligações que compõem a seção, segundo a norma ABNT NBR 7190:1997: “As ligações com cola somente podem ser empregadas em juntas

longitudinais da madeira”, sendo assim esse trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de vigas compostas por 2 espécies de madeira (sucupira e angelim ferro) coladas entre si.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 CONDIÇÕES DE CÁLCULO

Segundo Brulhões *et al* (2020), o comportamento mecânico das ligações em vigas de madeira se torna complexo devido à heterogeneidade e anisotropia da madeira e também em consequência das ligações serem constituídas por materiais com comportamentos mecânicos diferentes. As principais condições, considerando hipóteses e pressuposições, são de que o material é homogêneo, apresentando em todos os pontos as mesmas características mecânicas, elásticas e de resistência. Isotrópico, possuindo as mesmas características elásticas em todas as direções. Elástico Linear, considerando que a tensões e deformações são linearmente relacionadas (HIBBELER, 2010). Também é necessário considerar a Lei de Hooke, afirmando que a deformação é diretamente proporcional a tensão exercida sob o corpo.

### 2.2 CONDIÇÕES DE CÁLCULO. MATERIAL MADEIRA (ANGELIM FERRO E SUCUPIRA)

De acordo com Silva e Oliveira (pg. 234, 2003) a madeira é um material altamente higroscópico, uma vez que possui uma estrutura complexa, heterogenia e orgânica. O estudo dessa característica é imprescindível, já que está diretamente ligado com a umidade do ambiente e da madeira, que faz o material retrainar ou avolumar de acordo com a variação dessa umidade. Com isso, tal variação irá afetar as peças em serviço e consequentemente as características mecânicas dos elementos estruturais do material em estudo.

Segundo o IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas a Sucupira com o nome científico (*Diplotropis spp*), no Brasil há ocorrência nos estados de Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Paraná, Rondônia. Apresenta cerne e alburno distintos pela cor, cerne pardo-escuro-acastanhado, moderadamente difícil de ser trabalhada devido à grã reversa. E suas propriedades mecânicas, densidade aparente ( $\rho_{ap,15}$ ) é de 940 kg/m<sup>3</sup>. A resistência ( $f_M$ ) é de 147, MPa, e com um módulo de elasticidade ( $E$ ) de 16060 MPa.

Já o Angelim Ferro com o nome científico (*Hymenolobium spp*), no Brasil há ocorrência nos estados de Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Rondônia. Apresenta cerne e alburno poucos distintos pela cor, cerne castanho-avermelhado, brilho moderado, densidade alta, difícil de ser trabalhada devido ser dura ao corte, porém recebe um bom acabamento. Algumas propriedades mecânicas de acordo com o IPT, a densidade aparente a 15% de umidade ( $\rho_{ap,15}$ ) é de 1090 kg/m<sup>3</sup>. A resistência ( $f_M$ ) da madeira a 15% de umidade é de 138,1 MPa, e com um módulo de elasticidade ( $E$ ) de 14073 MPa.

Para fins de entendimento ao longo do artigo a Sucupira (*Diploptropis spp*) será considerada a espécie 1, e o Angelim ferro (*Hymenolobium spp*), será considerado a espécie 2, onde:

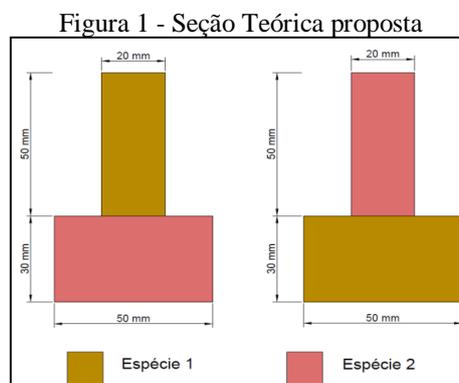
Tabela 1: Nomenclatura Corpos de Prova.

Corpos de provas	Configuração
U1 - (x)	Espécie 1
U2 - (x)	Espécie 2
CP 12-1, CP 12-2, CP 12-3	Espécie 1 – Alma, Espécie 2 - Mesa
CP 21-1, CP 21-2, CP 21-3	Espécie 2 – Alma, Espécie 1 - Mesa

Fonte: Autores (2022)

### 2.3 SEÇÃO DA VIGA T PROPOSTA E MONTAGEM

O artigo realizado aborda o estudo do comportamento de uma viga em seção T, onde a densidade entre a alma e a mesa é substituída de forma a inverter esses elementos entre si, submetendo copos de prova ao ensaio de flexão em 1 ponto de forma biapoiada, conforme enunciado apresentado pelo orientador. Com base nisto e dentro da limitação imposta de valores máximos da seção transversal de 25 cm<sup>2</sup> no total, foi confeccionada 3 vigas de cada configuração, com a mesa e alma possuindo as seguintes dimensões, conforme mostra a figura 1



Fonte: Autores (2022)

Para a colagem entre a alma sob a mesa da viga foi utilizado um Adesivo em dispersão aquosa à base de poliacetato de vinila (PVAc) da marca Cascola modelo Cascorez Extra. É um produto com forma líquida, cor branca, viscoso e livre de grumos. O processo ocorreu através da aplicação da cola PVA sob toda a superfície de colagem disponível da alma, com a aplicação de pressão em um período de tempo de 4 horas, e tempo de cura de no mínimo 24 horas antes do ensaio de modo a garantir que a colagem ocorra de forma correta como o fabricante recomenda. Conforme mostra a figura 2

Figura 2 - Visão da seção transversal do CP 12-1



Fonte: Autores (2022)

#### 2.4 UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA E PESO PRÓPRIO

Primeiramente foi realizado o ensaio para determinar o teor de umidade da madeira assim podemos ter parâmetros de suas propriedades mecânicas que podem variar de acordo com este parâmetro. Para realização desse ensaio foram necessários uma balança de precisão de 0,01g e uma estufa, este ensaio foi realizado de acordo com o item B.5 da ABNT NBR 7190/1997 onde relaciona a massa inicial com a massa final (massa seca), onde a massa é considerada seca, mantendo-se os corpos-de-prova na estufa a 103 °C até que a massa do corpo-de-prova tenha variação de massa inferior a 0,5%, os dados foram coletados a cada 24 horas, conforme mostra a figura 3.

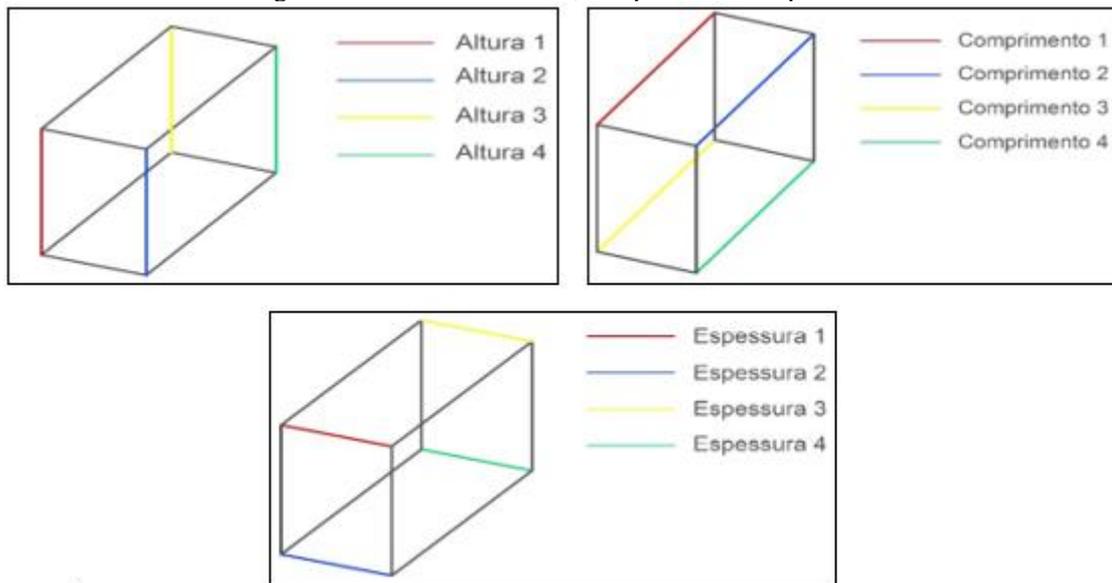
Figura 3 - Corpos de Prova para ensaio de densidade



Fonte: Autores (2022)

Para a determinação do peso próprio real das vigas utilizadas no ensaio foi utilizados as informações obtidas para a relação entre a massa inicial e os volumes. Para a medição dos corpos de prova utilizou-se as seguintes medidas para os 12 corpos de prova de ensaio de densidade e as 6 vigas para o ensaio a flexão.

Figura 4 - Medidas de Alturas, comprimentos e espessuras



Fonte: Autores (20220)

A partir da média obtida de todos os corpos de prova para cada dimensão, foi esquematizado dois corpos de prova fictícios para cada espécie que representam o volume médio a ser utilizados nos cálculos, a partir das equações a seguir:

$$\text{Média Corpos de prova } U(n) - (\text{Espécie } 1 - 2) \left\{ \frac{\sum \text{Alt}x}{6} \frac{\sum \text{Esp}x}{6} \frac{\sum \text{Com}x}{6} \right\} / 6$$

(Equação 1)

Conhecendo o valor médio dos volumes e das massas pode-se então calcular a massa específica real das espécies utilizadas, sendo que:

$$\rho = m / V \quad (\text{Equação 2})$$

Onde  $\rho$  (Kg/m<sup>3</sup>) é a massa específica da madeira estudada,  $m$  (Kg) é a média da massa inicial dos corpos de prova e  $V$  (m<sup>3</sup>) é a média do volume dos corpos de prova.

Para o cálculo de área da seção transversal da mesa e da alma de cada uma das vigas, o mesmo método foi utilizado, através da média das áreas frontais ( $A_f$ ) e áreas posteriores ( $A_p$ ) de cada um dos elementos.

$$\text{Média Área Elemento } (x) = (A_f + A_p) / 2 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde  $A_f$  (m<sup>2</sup>) é a área frontal da mesa/alma de cada viga e  $A_p$  (m<sup>2</sup>) é a área posterior da mesa/alma de cada viga ensaiada. Com estas informações pode-se encontrar o peso próprio dos elementos da viga (alma e mesa), pela equação 4.

$$P_p = \rho * A \quad (\text{Equação 4})$$

Onde  $P_p$  (Kgf/m) é o peso próprio do elemento,  $\rho$  (Kg/m<sup>3</sup>) é a massa específica encontrada e  $A$  (m<sup>2</sup>) é a área da seção transversal do elemento (Alma e/ou mesa). Transformando ao final, o valor do peso próprio para Kilo Newtons por metro, conforme mostra a equação 5.

$$P_p (KN/m) = (P_p (Kgf/m) * 9,8) * 10^{-3} \quad (\text{Equação 5})$$

## 2.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO

O ensaio de flexão foi realizado em todas as 6 vigas, assim podendo analisar o comportamento delas. As vigas foram posicionadas em dois apoios móveis que impedem o movimento no eixo Y, esses apoios estavam situados a 0,05 metros da extremidade da viga, elas foram sujeitadas a um carregamento pontual vertical representado por 'P' e pelo seu peso próprio que atua como um carregamento distribuído representado por 'C', conforme mostra a figura 5.

Figura 5 - Máquina de Ensaio e corpo de prova bi apoiado.



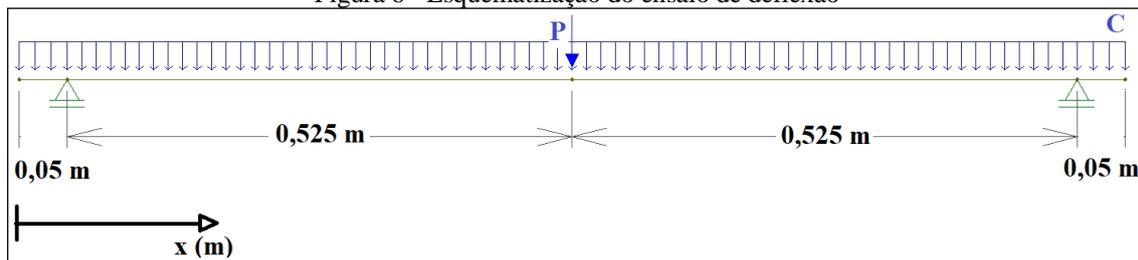
Fonte: Autores (2022)

O modelo da máquina utilizada foi da marca Instron, fabricante de máquinas para ensaio de tração, compressão, fadiga, impacto, reologia e estruturais, sendo o modelo da serie 23-100 EMIC, capaz de exercer uma faixa de carga de até 100 Kilonewtons (KN), realizado o ensaio sob a mesa afim de evitar flambagem lateral com torção dos elementos estruturais. Os dados reais de carga de ruptura, módulo de Young e deflexão máxima dos corpos de prova são obtidos após o ensaio pelo software Bluehill integrado à máquina de ensaio.

## 2.6 EQUAÇÕES PARA CARGA DE RUPTURA

Para a equação de carga de ruptura consideramos o trecho (0,050 m < x < 0,575 m), pois é no ponto 0,575 m que se encontra o momento máximo, conforme mostra a figura 6.

Figura 6 - Esquematização do ensaio de deflexão



Fonte: Autores (2022)

Onde,  $P$  (Kilo Newtons) é carga pontual aplicada,  $C$  (KN/m) é a carga distribuída ou peso próprio da viga, encontrando a equação para o trecho de maior momento tem-se.

$$M(x) = CD * (-x^2 + 0,575x - 0,2875) + P * (0,2875 - 0,025)$$

$$M(0,575) = -0,1222 CD + 0,2625 P \quad \text{(Equação 6)}$$

Sendo  $CD$  (N/m) a carga distribuída,  $P$  (N) a carga pontual aplicada no centro da viga e  $M$  (N\*m) o momento. Com tais informações partimos para análise geométrica da seção, assim como também a carga de ruptura da viga estipulada. Com a utilização das fórmulas de flexão para vigas, tem-se a equação 7.

$$\sigma_f = (M(\text{máx}) * C_y) / I \quad (\text{Equação 7})$$

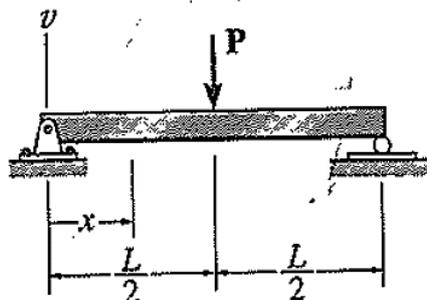
Sendo  $\sigma_f$  (Pa) a tensão máxima da flexão do material,  $M(\text{máx})$  (N\*m) é o momento máximo da viga,  $C_y$  (mm) a distância da superfície comprimida até a linha neutra da seção, sendo que a linha neutra pode ser calculada pela equação 8.

$$y = (\sum A * d) / \sum A \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo  $A$  (mm) a área da seção transversal do elemento estrutural (Alma e Mesa),  $d$  (mm) é a distância do referencial de eixo ao centroide de suas respectivas áreas. O  $I$  ( $mm^4$ ) será Momento de Inercia, sendo utilizado o teoremas dos eixos paralelos já que a seção transversal não é simétrica.

Para o cálculo da deflexão em viga biapoiada com carregamento concentrado foi utilizado o apêndice D do livro Hibbler – Análise Estrutural 8 Ed. Pág. 473.

Figura 7 - Deflexão em viga biapoiada



Fonte: Hibbeler, 2009

Devido as tensões de ruptura por compressão serem menores, a inercia considerada será da área comprimida da seção, sendo assim tem-se

$$f_{\text{máx}} = P(\text{max}) \cdot L^3 / 48 \cdot E \cdot I \quad (\text{Equação 9})$$

Onde  $f_{\text{máx}}$  (mm) é o deslocamento máximo em escoamento,  $L$  (mm) é o comprimento do corpo de prova,  $E$  (Mpa) é o Módulo de Yong e  $I$  ( $mm^4$ ) é o momento

de inércia da seção sujeita a compressão

### 3 RESULTADOS

Utilizando os métodos e equações apresentados durante este artigo, podemos encontrar os valores de umidade, após o ensaio realizado em laboratório, conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Massas iniciais, massas secas e umidade.

Corpos prova	deMassa (gramas)	0hMassa (gramas)	24hVariação (%)	24hMassa (gramas)	48hVariação (%)	48hUmidade Inicial (%)
U1-1	28,49	24,74	13,16	24,63	0,44	13,55
U1-2	26,61	23,18	12,89	23,1	0,35	13,19
U1-3	28,99	25,15	13,25	25,07	0,32	13,52
U1-4	27,93	24,31	12,96	24,24	0,29	13,21
U1-5	30,55	26,46	13,39	26,36	0,38	13,72
U1-6	28,51	24,7	13,36	24,66	0,16	13,50
U2-1	32,9	28,9	12,16	28,8	0,35	12,46
U2-2	34,44	30,07	12,69	30	0,23	12,89
U2-3	34,65	30,19	12,87	30,12	0,23	13,07
U2-4	35,27	30,68	13,01	30,61	0,23	13,21
U2-5	33,51	29,42	12,21	29,34	0,27	12,44
U2-6	33,9	29,66	12,51	29,61	0,17	12,65

Fonte: Autores (2022)

Para as medidas dos corpos de prova de umidade, utilizou-se paquímetro para aferição dos valores, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Medidas dos corpos de prova para cálculo de densidade.

Corpos de Prova	Comprimentos (cm)				Espessuras (cm)				Alturas (cm)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Espécie 1-1	5,05	5,01	5,05	5,1	2	2	2	2	3,1	3,1	3,1	3,1
Espécie 1-2	4,8	4,75	4,8	4,75	1,95	2	2	2	3,1	3,1	3,1	3,1
Espécie 1-3	4,85	4,8	4,89	4,85	2,1	2,1	2,1	2,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Espécie 1-4	4,85	4,9	5	5	2	2	2,05	2	3,1	3,1	3,1	3,1
Espécie 1-5	5,05	5,1	5,1	5,1	2,1	2,1	2,1	2,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Espécie 1-6	4,7	4,8	4,7	4,7	2,1	2,1	2,1	2,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Espécie 2-1	4,9	4,9	4,9	4,7	2,1	2,1	1,9	2,1	3,	3,1	3,1	3,1
Espécie 2-2	5,1	5,1	5,1	5,1	2,15	2,1	2,1	2,1	3,1	3,1	3	3,1
Espécie 2-3	5,1	5,1	5,1	5,1	2,1	2,1	2,1	2,1	3,1	3	3,1	3
Espécie 2-4	5,2	5,3	5,2	5,2	2,1	2,1	2,1	2,1	3,1	3	3,1	3
Espécie 2-5	5	5	5	4,9	2,1	2,1	2,1	2,1	3	3,1	3,1	3
Espécie 2-6	5	5	5	5	2,1	2,1	2,1	2,1	3	3,1	3,1	3

Fonte: Autores (2022)

Com as massas específicas teóricas encontradas em norma de cada madeira e dos cálculos da massa específica real encontrados a partir das médias dos volumes e das massas iniciais dos corpos de prova utilizados no ensaio de umidade, temos o resultado

dos pesos próprios das vigas ensaiadas, vistos nas Tabelas 4, 5, 6 e 7, e na Tabela 8 o peso próprio total da viga composta.

Tabela 4 - Peso Próprio Teórico da alma e mesa (Sucupira).

Alma			
Corpos de Prova (Vigas)	Massa específica(Kgf/m <sup>3</sup> )	Área Seção(m <sup>2</sup> )	Peso Próprio(KN/m)
CP 12-1	1106	0,001	0,0108
CP 12-2	1106	0,001	0,0108
CP 12-3	1106	0,001	0,0108
Mesa			
CP 21-1	1106	0,0015	0,01627479
CP 21-2	1106	0,0015	0,01627479
CP 21-3	1106	0,0015	0,01627479

Fonte: Autores (2022)

Tabela 5 - Peso Próprio Teórico da alma e mesa (Angelim Ferro).

Alma			
Corpos de Prova (Vigas)	Massa específica(Kgf/m <sup>3</sup> )	Área Seção(m <sup>2</sup> )	Peso Próprio(KN/m)
CP 21-1	1170	0,001	0,011478
CP 21-2	1170	0,001	0,011478
CP 21-3	1170	0,001	0,011478
Mesa			
CP 12-1	1170	0,0015	0,017217
CP 12-2	1170	0,0015	0,017217
CP 12-3	1170	0,0015	0,017217

Fonte: Autores (2022)

Tabela 6 - Peso Próprio Real da alma e mesa (Sucupira).

Alma			
Corpos de Prova (Vigas)	Massa específica(Kgf/m <sup>3</sup> )	Área Seção(m <sup>2</sup> )	Peso Próprio(kN/m)
CP 12-1	913,7885772	0,00100725	0,009020053
CP 12-2	913,7885772	0,0010605	0,009496913
CP 12-3	913,7885772	0,00105175	0,009418556
Mesa			
CP 21-1	913,7885772	0,00154	0,0137887
CP 21-2	913,7885772	0,001558	0,0139499
CP 21-3	913,7885772	0,0015	0,0134327

Fonte: Autores (2022)

Tabela 7 - Peso Próprio Real da alma e mesa (Angelim Ferro).

Alma			
Corpos de Prova (Vigas)	Massa específica(kgf/m <sup>3</sup> )	Área Seção(m <sup>2</sup> )	Peso Próprio(kN/m)
CP 21-1	1056,11	0,001048	0,010847
CP 21-2	1056,11	0,001061	0,010976
CP 21-3	1056,11	0,001068	0,011051
Mesa			
CP 12-1	1056,11	0,001556	0,016099
CP 12-2	1056,11	0,00153	0,015835
CP 12-3	1056,11	0,001573	0,016283

Fonte: Autores (2022)

Tabela 8 - Peso Próprio Teórico e Real Total dos corpos de prova.

Corpo de Prova (Vigas)	Peso Próprio (kN/m) - Teórico	Peso Próprio (kN/m) - Real
CP 12-1	0,028066	0,025119284
CP 12-2	0,028066	0,025332223
CP 12-3	0,028066	0,025701498
CP 21-1	0,027752	0,024635
CP 21-2	0,027752	0,024926
CP 21-3	0,027752	0,024484

Fonte: Autores (2022)

Nas Tabelas 9 e 10, estão expressos os valores encontrados (Reais e Teóricos) para as forças de escoamento, módulo de Young e os deslocamentos em escoamento.

Tabela 9 - Força em Escoamento, Módulo de Young e Deslocamentos Teóricos.

	Força em Escoamento [kN]	Módulo de Young (ABNT NBR 7190:97)	Deslocamento em Escoamento (Inclinação zero) [mm]
CP 12-1	8,708449	21724,00	46,4050
CP 12-2	8,708449	21724,00	46,4050
CP 12-3	8,708449	21724,00	46,4050
CP 21-1	8,382540	20827,00	46,5925
CP 21-2	8,382540	20827,00	46,5925
CP 21-3	8,382540	20827,00	46,5925
Coefficiente de variação	0,778492	0,860612	0,130158
Desvio padrão	0,066526	183,0994	0,060522
Intervalo	0,325909	897,00	0,0937
Máximo	8,708449	21724,00	46,5925
Média	8,545494	21275,50	46,4987
Mediana	8,545494	21275,50	46,4987

Fonte: Autores (2022)

Tabela 10: Força em Escoamento, Módulo de Young e Deslocamentos Reais.

	Força em Escoamento (Inclinação zero) [Kn]	Módulo (Young automático) [MPa]	Deslocamento em Escoamento (Inclinação zero) [mm]
CP 12-1	7,0549	21232,1215	38,7421
CP 12-2	6,9241	10512,8388	62,3388
CP 12-3	8,4763	19463,5406	-----
CP 21-1	7,8595	10869,5624	47,5636
CP 21-2	8,4069	13913,0936	39,5020
CP 21-3	8,6880	12243,5833	55,5316
Coefficiente de variação	10,1160	31,0454	20,9688
Desvio padrão	0,79	4565,47	10,22
Intervalo	1,7639	10719,2827	23,5967
Máximo	8,6880	21232,1215	62,3388
Média	7,7867	14705,7901	48,7356
Mediana	7,8595	13078,3385	47,5636

Fonte: Autores (2022)

#### 4 DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios para determinação do teor de umidade a 12% e densidade aparente são mostrados na Tabela 2 e 3 conforme a condição-padrão de referência abordada pela NBR 7190/1997. Autores como Stangerlin et al., (2010),

(SILVA; OLIVEIRA, 2003) relataram que o teor de umidade afeta a resistência da madeira.

Com o aumento da umidade, ocorre a redução da resistência mecânica até ser atingido o PSF (Ponto de Saturação das Fibras), acima desse ponto a resistência se mantém constante. À vista disso, torna-se de grande importância a análise da umidade, dado que, além de afetar a resistência mecânica da madeira, atinge também a trabalhabilidade, estabilidade dimensional, durabilidade natural e colagem.

Em primeiro momento, foi observado que os corpos de prova que apresentaram flambagem lateral com torção (FLT) de forma mais evidente na alma, como mostra a figura 8, pois não possuíam contenção lateral, suscitou no colapso por flambagem local da alma comprimida, para um momento inferior ao de plastificação do elemento composto.

Isso pode ser elucidado pela maneira como a carga foi empregada, induzindo altas tensões localizadas, o que ocasionou no aparecimento precoce de instabilidade local da alma comprimida. Corrêa de Faria (2018) enfatiza que a FLT é um estado-limite global de vigas devido à ação do momento fletor, cuja a instabilidade é caracterizada pela saída lateral da parte comprimida do perfil e um giro da seção transversal.

Figura 8 - Flambagem Lateral com Torção da Alma



Fonte: Autores (2022)

De acordo com MacGregor (1993) com valores de deslocamento de uma estrutura, podendo ser observado na figura 9, as deflexões laterais do corpo podem atenuar o momento fletor com o surgimento de esforços adicionais denominados de segunda ordem. Este tipo de comportamento é chamado de não-linearidade geométrica (NLG). Neste caso as equações de equilíbrio seguindo as hipóteses de cálculo poderá não retratar os reais esforços na viga ensaiada.

Figura 9 - Deslocamentos Horizontais e Verticais.



Fonte: Autores (2022)

Figura 10: Colapso da Alma



Fonte: Autores (2022)

Nas Vigas onde a flambagem com torção foram menores que as similares ao exemplo anterior, estas romperam de forma esperada como um elemento único, como mostra as figuras 11 e 12.

Figura 11 - Ruptura da alma e mesa



Fonte: Autores (2022)

Figura 12 - Ruptura da alma e mesa - vista Lateral.



Fonte: Autores (2022)

Apesar do procedimento de aplicação da cola PVA sob toda a superfície de colagem disponível da alma, com a inserção de pressão em um período de tempo de 4

horas e cura de 24 horas conforme orienta o fabricante (tabela 2), foi observado defeitos de colagem que ocasionaram descontinuidades nas interfaces alma e mesa. No entanto, devido as condições geométricas do ensaio referente a linha neutra da seção transversal é possível afirmar que a resistência mecânica do elemento composto não apresentou decréscimo de resistência.

A troca de espécies entre a mesa e alma da viga teve influência pelo fato das características físicas distintas, tornarem a flambagem lateral com torção da mesa com a espécie angelim ferro (*Hymenolobium spp*), serem menores que a espécie sucupira (*Diploptropis spp*), atenuando os efeitos de segunda ordem nos corpos de prova CP 21, tornando a carga crítica maior quando comparado aos corpos de prova CP 12.

## 5 CONCLUSÕES

Em virtude dos fatos mencionados, as vigas em T invertido compostas por duas espécies de madeira, sendo angelim ferro e sucupira, ao serem submetidas ao ensaio de resistência a flexão sem contenção lateral apresentaram distinções quanto ao comportamento da alma em relação as espécies, sendo a flambagem lateral com torção acentuada para a espécie com menor resistência a flambagem (Sucupira), por isso apesar do angelim ferro apresentar menores valores de resistência, as vigas onde esta espécie estava sujeita a maiores esforços se comportou de maneira mais próxima quanto ao previsto em cálculo.

## REFERÊNCIAS

ALVIN, R. C. Projeto de estruturas de madeira: peças compostas comprimidas. São Paulo. Blücher Acadêmico. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7190:1997: Projetos de estruturas de

BULHÕES, M. S.; Dias, J. M. S.; Cunha, R. D A.; César, S. F. “Influência da densidade básica de madeiras em furações para ligações coladas com barras de aço.” Brazilian Applied Science Review, v. 4, n. 6, p. 3395-3405, nov./dez. 2020.

CASCOLA. Descrição do Produto, folha de dados técnicos. 2021. Disponível em: <https://www.cascola.com.br/pt/produtos/colas-brancas-pva/cascorez-extra.html>, acesso em 15 de dezembro de 2021.

CORREIA, E. A. S. Análise e dimensionamento de estruturas de madeira. Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Porto – Portugal, 2009.

GALAL, K.; SEKAR, M. Reabilitação de vigas RC em T invertido com chapas de PRFC ancoradas. Compósitos Parte B: Engenharia, v. 39, n. 4, pág. 604-617, 2008.

GARBER, D. B. et al. Desempenho de bordas em vigas em T invertido. ACI Structural Journal, v. 114, n. 2, pág. 487, 2017.

GONÇALVES, F. G. et al. Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Revista Árvore, v. 33, n. 3, p. 501-509, 2009.

IPT. Instituto de pesquisas tecnológicas do Estado de SP, 2022. Disponível em: <https://www.ipt.br/>. Acesso em: 20 de dez. de 2021.

MACGREGOR. J.G. Design of slender concrete columns: Revisited. ACI Structural Journal, 1993. madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

NAYAL, R. M. N. Pós-tensionamento do sistema de ponte em T invertido para maior durabilidade e maior relação vão-profundidade. Universidade Estadual do Kansas, 2006.

R. C. HIBBELER. Resistência dos Materiais 7º edição, São Paulo 2009.

RODRIGUES, S. O; *et al.* Influência da existência de uma linha de cola PVAc em uma seção quadrada composta de uma viga de maçaranduba (*Manilkara* spp.). Brazilian Applied Science Review, Curitiba, v.6, n.4, p. 13946-13956 jul./aug., 2022

SILO.TIPS. Série 23 EMIC. Um novo conceito em tecnologia e acessibilidade. Setembro 2017 Disponível em: <https://silo.tips/download/serie-23-emic-um-novo-conceito-em-tecnologia-e-acesibilidade> Acesso em: 16 Janeiro 2022.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. Revista Árvore, Viçosa, v.27, 2003.

STANGERLIN, D. M. Avaliação do uso de estufa solar para secagem de madeira serrada de eucalipto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

TOMIM, k. C. Análise e dimensionamento de vigas T invertidas para aplicação em pontes e viadutos. Dissertação de Mestrado. Maringá, 2019.

VALLE, A. et al. Estruturas de Madeira. Universidade Federal de Santa Catarina. Versão 3. Florianópolis, 2015.