

Redução do deslocamento vertical em vigas de madeira maciça através da protensão com cabos de aço

Sarah Lodeti Pessi ^[1], Augusto Wanderlind ^[2], Elaine Guglielmi Pavei Antunes ^[3],
Daiane dos Santos da Silva Godinho ^[4], Marcio Vito ^[5]

[1] sara.lodeti@hotmail.com. Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). [2] augustoawd@gmail.com. Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). [3] elainegpa@unes.net. Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). [4] dss@unes.net. Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). [5] marciovito@unes.net. Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

RESUMO

A madeira é um material usual e versátil. No entanto, sua limitação está aliada à sua deformação, devido ao módulo de elasticidade ser inferior quando comparada a outros materiais, como aço e concreto. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é diminuir o deslocamento vertical através da protensão com cabos de aço. A pesquisa foi realizada com seis vigas de madeira maciça, três vigas foram protendidas e as outras três utilizadas como referência. As seis amostras foram submetidas a ensaios de umidade, densidade básica e flexão estática a quatro pontos. A protensão foi realizada com cabos de aço unidos a barras roscadas a partir do rosqueamento de porcas. Os ensaios demonstraram uma umidade média de 59,35%, indicando se tratar de uma madeira em estado verde, e densidade básica de 747,55 kg m⁻³. O resultado médio de carga obtido no ensaio de flexão a quatro pontos das vigas protendidas demonstraram acréscimo em relação às vigas referências de 8,36%, para o limite de deslocamento em 10 mm, 6,47% para a deflexão de 8 mm e 2,73% na ruptura. Além disso, o estudo mostrou aumento da ductilidade devido a uma maior deformação na carga última das vigas protendidas em comparação às vigas referências em 26,96%.

Palavras-chave: Protensão. Deflexão. Deformação. Madeira maciça.

ABSTRACT

The wood is a usual and versatile material. However, its limitation is allied to its deformation, due to the modulus of elasticity being lower when compared to other materials such, as steel and concrete. In this context, the objective of this study is to reduce the vertical displacement through prestressing with steel cables. The research was conducted with six solid wood beams, three beams were prestressed and the other three used as reference. The six samples were subjected to moisture content, basic density and four-point static bending tests. Prestressing was carried out with steel cables connected to threaded bars by threading nuts. The tests showed an average moisture content of 59,35%, indicating that it is a wood in green state, and a basic density of 747,55 kg m⁻³. The average load results obtained in the four-point bending test of the prestressed beams showed an increase in relation to the reference beams of 8,36%, for the displacement limit of 10 mm, 6,47% for the deflection of 8 mm and 2,73% at rupture. In addition, the study showed increased ductility due to greater deformation at ultimate load of prestressed beams compared to the reference beams by 26,96%.

Keywords: Prestressing. Deflection. Deformation. Solid wood.

1 Introdução

A madeira é um dos primeiros materiais empregados pelo homem, sendo conjuntamente empregada na época de proveito da pedra. Era muito utilizada em função da facilidade de manuseio para produção de utensílios, como elementos estruturais incorporados em moradias rudimentares de formato cônico e, também, devido à abundância encontrada. No entanto, a partir do século XIX ocorreu uma estagnação no uso da madeira, em consequência do advento do aço e do concreto, materiais que ofereciam uma rápida resposta ao sistema de construção, alta resistência e baixa deformabilidade, e por isso passaram a ser mais utilizados.

Com o avanço da tecnologia atual, se inicia o pensamento de empregar a madeira novamente com maior abundância em elementos estruturais, como vigas e pilares, e não somente em coberturas de telhados ou durante o processo de construção. Isso ocorre devido ao fato de a madeira ser um material natural, renovável e que necessita de pouca energia para o seu processamento quando comparado com outros materiais, como aço e concreto que emitem 8 e 21 vezes, respectivamente, mais carbono que a madeira para sua produção (FERNANDES; BRANCO, 2018).

Segundo Vidal *et al.* (2015), grande área do Brasil é coberta por floresta nativa, contudo o reaproveitamento desses recursos não é condizente com essa situação. Conforme relatório anual realizado pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020), no Brasil a madeira de reflorestamento ou madeira plantada é remetida ao beneficiamento de celulose, papel e painéis, além de ser exportada. Ainda de acordo com o mesmo relatório, de um total de 9 milhões de hectares plantados em 2019, a área de ocupação de espécies do gênero *Eucalyptus* representa 77%, enquanto o plantio de *Pinus* corresponde a 18% do total, sendo essas duas das maiores espécies comercializadas e utilizadas para a construção civil.

Um dos cuidados em utilizar a madeira para que permaneça com a resistência e suportando os esforços para o qual está sendo solicitada, é com relação a sua durabilidade, que está associada ao tratamento recebido contra os agentes biológicos que o ambiente remete, e à qualidade da espécie da madeira, referente a madeiras com alta durabilidade natural que atualmente não se encontra no mercado, tornando necessário o uso de madeiras com crescimento rápido,

necessitando de tratamento à base de preservativos com arseniato de cobre cromatado (CCA) ou borato de cobre cromatado (CCB) (VIDAL *et al.*, 2015).

A madeira possui características físicas e mecânicas dependentes de sua qualidade, que são necessárias para empenhar as funções às quais estão submetidas, tornando-a um material versátil (ALVES, OLIVEIRA, CARRASCO, 2017; VIDAL *et al.*, 2015). No entanto, possui limites relacionados à sua deformação, devido ao módulo de elasticidade ser inferior aos demais materiais empregados para a mesma finalidade.

Atualmente, estudos estão sendo realizados com o intuito de minimizar as deformações e efeitos ocasionados dessa ação. Segundo Lima, Costa e Rodrigues (2018), as estruturas ao longo de sua vida útil se deformam devido aos esforços sofridos e para que as estruturas voltem a ter determinada resistência aos esforços atuantes, pode ser utilizado o aço como elemento para reforço, utilizando técnicas de pré-esforço que consiste, de um modo geral, em empregar uma excentricidade entre o aço e a madeira, produzindo um efeito de tração que gera uma contra-flecha, evitando uma deformação excessiva e aumentando sua capacidade de resistência em função do aço empregado.

Os estudos sobre a interação entre aço e madeira também foram realizados por Soriano, Pellis e Mascia (2016), que adicionaram barras de aço a vigas de madeira laminada colada, com o objetivo de reduzir a variabilidade da resistência da madeira e melhorar a rigidez. No estudo, ao invés de utilizar as técnicas de pré-esforço, as barras foram inseridas no interior da madeira através de sulcos feitos nas tábuas e aderidas utilizando adesivo poliuretano.

A protensão consiste na aplicação de um estado prévio de tensões a um determinado material, melhorando seu comportamento e aumentando a resistência à flexão perante a aplicação de esforços compressivos no mesmo (MCCONNELL; MCPOLIN; TAYLOR, 2014), utilizando geralmente o aço como meio para atingir esse objetivo. Essa técnica pode ser utilizada em diversos materiais, inclusive na madeira, podendo ser encontrada em pontes e em estudos utilizando vigas laminadas coladas.

A técnica de protender uma ponte de madeira se originou no Canadá, na década de 70, devido à necessidade de reconstruções das pontes pregadas, que apresentavam problemas de deslocamento e diferenças de seções transversais. O método consiste

em aplicar a protensão no sentido transversal de lâminas de madeira, criando uma placa ortotrópica unida, resultando em retorno significativo da resistência da ponte, sendo por isso um método empregado por diversos países para construções de pontes de pequenos vãos (CHEUNG *et al.*, 2017).

Negrão (2012) aplicou o sistema de protensão em vigas de madeira laminada colada com o objetivo de melhorar a resistência e reduzir as deflexões, aplicando dois métodos: pré e pós-tração. No sistema pré-tração, o aço é alongado antes de ser colado à viga de madeira laminada. No pós-tração, primeiramente é aderido o aço à madeira com uso de cola e após essa estar totalmente curada e possa suportar a força advinda da protensão, o esforço é aplicado.

De forma a melhorar a resistência mecânica da madeira e diminuir o deslocamento vertical, o objetivo do estudo foi utilizar vigas de madeira maciça em conjunto com cabos de aço, provocando a protensão desse com a execução de uma contraflecha temporária na viga, evitando assim deformações excessivas, transformando o modo de ruptura frágil em dúctil, e dificultando problemas futuros devido à fluência da madeira.

2 Materiais e Métodos

Foi realizado o estudo com seis vigas de madeira maciça, três vigas utilizadas como referência e as outras três vigas para desenvolver o objeto de estudo, sendo protendidas. A espécie de madeira utilizada no estudo foi a *Eucalyptus Citriodora*, em função de ser uma espécie de reflorestamento, que possui crescimento relativamente rápido, quando comparada a outras espécies, alta densidade e, conseqüentemente, maior resistência mecânica, além de ser uma das espécies mais usuais na construção civil.

As seis vigas foram submetidas aos ensaios de umidade e densidade conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997). Verificou-se a resistência das vigas protendidas em comparação com as vigas de referência na ruptura e no limite do deslocamento de $L/200$, de acordo com o item 9.2.1 da NBR 7190 (ABNT, 1997), e no limite de $L/250$, de acordo com a Tabela 7.2, item 7.2, do EUROCODE 5 (CEN, 2004) para deformações instantâneas, através do ensaio de flexão a quatro pontos.

Em decorrência de ser um sistema estrutural que envolve mais de um material com características

diferentes, o estudo também verificou visualmente a interface de contato entre a madeira e o aço.

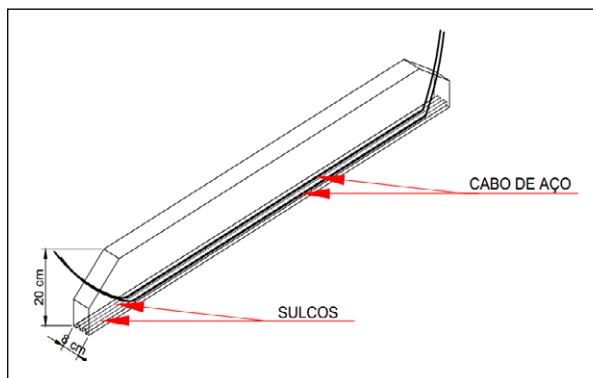
A umidade é uma propriedade que está relacionada com a resistência e a rigidez da madeira, sendo essencial conhecê-la. O ensaio foi executado conforme o Anexo B, item 5, da NBR 7190 (ABNT, 1997), com três amostras retiradas de cada uma das vigas ensaiadas, medindo $2 \times 3 \times 5$ cm.

A densidade é uma característica que varia muito, conforme as espécies de madeira. Para a espécie *Eucalyptus citriodora*, a Tabela E.1 da NBR 7190 (ABNT, 1997) indica uma densidade aparente (densidade para umidade de 12%) de 999 kg m^{-3} , sendo essa uma alta densidade comparada às outras espécies de *Eucalyptus*. Em vista disso, foi ideal determinar a densidade básica das vigas em estudo, uma vez que essa propriedade influencia no peso próprio da madeira e, conseqüentemente, na carga permanente da viga. A prática foi executada conforme o Anexo B, item 6 da NBR 7190 (ABNT, 1997), com três corpos de prova retirados de cada viga ensaiada, medindo $2 \times 3 \times 5$ cm.

A viga de madeira maciça foi confeccionada com seção transversal de 8×20 cm, totalizando uma área de 160 cm^2 para as vigas referências. Para as vigas protendidas, a seção transversal no centro do vão foi de 157 cm^2 devido à execução dos sulcos. Ambas as seções estão de acordo com o limite imposto pelo item 10.2.1 da NBR 7190 (ABNT, 1997), de 50 cm^2 e espessura mínima de 5 cm. O comprimento da viga foi de 2 m.

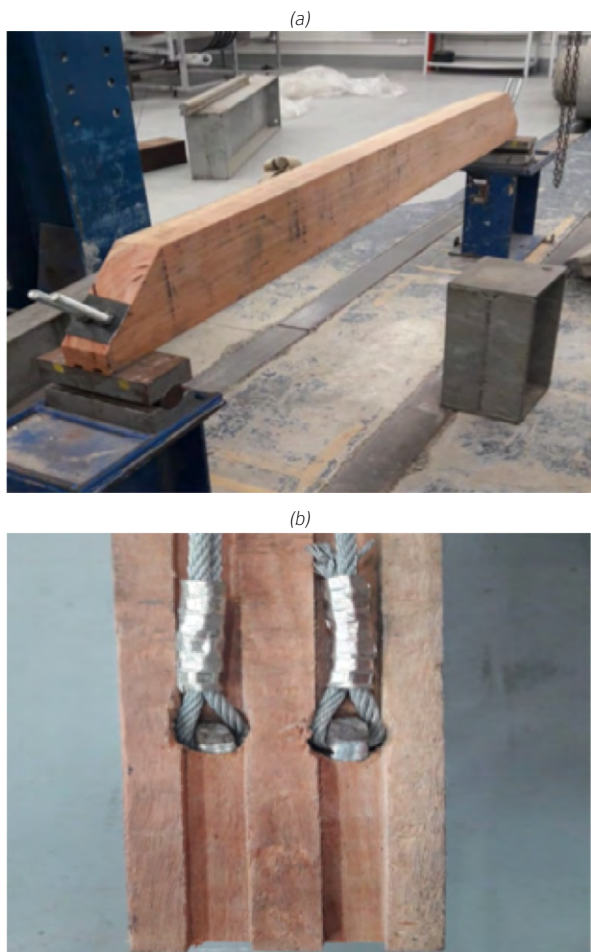
A modelagem utilizada foi elaborada pelos próprios autores e está representada de maneira ilustrativa na Figura 1 e de maneira efetiva na Figura 2 (a), sendo composta de dois cabos de aço de 6,35 mm unidos com barras roscadas de 15,88 mm. Os cabos de aço foram colocados em todo o comprimento longitudinal da viga através de dois sulcos de 15×10 mm realizados na face inferior da viga, como indica a Figura 2 (b), restando duas regiões nas extremidades da face com 2 cm e a região central com 1 cm. Os cabos atingiram a superfície superior da viga em 1 cm abaixo da linha neutra, com o objetivo de que a força aplicada ao cabo comprimissem a região onde se encontra a área tracionada. Os cabos foram introduzidos através de orifícios de 16,50 mm, realizados a 45° , ligando a face inferior com a superior. O ângulo de 45° é o ideal a ser utilizado em função da maior resistência ao cisalhamento que é proporcionada.

Figura 1 – Modelagem da viga



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 2 – Confeção da viga: (a) modelagem da protensão, (b) sulcos para passagem do cabo de aço

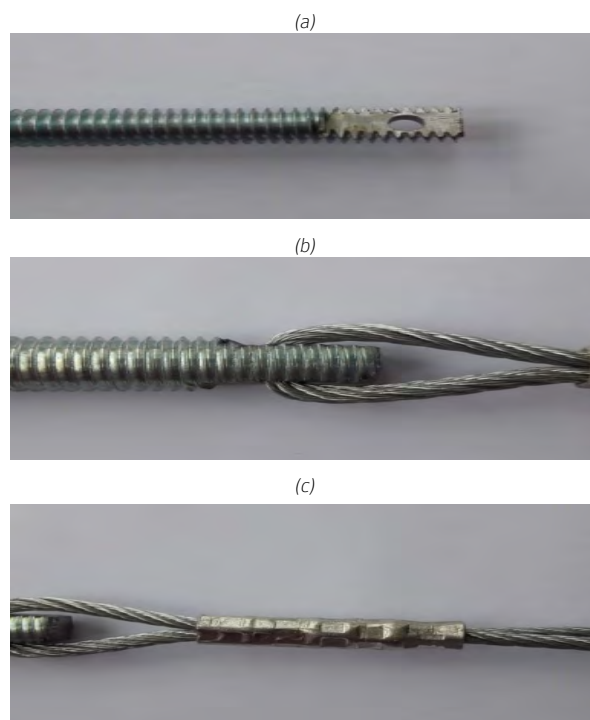


Fonte: Elaborada pelos autores.

A união da barra rosca com o cabo de aço foi idealizada pelos autores e realizada em uma oficina metalúrgica através do esmerilhamento da parte inferior da barra até um comprimento de 30 mm a partir

da extremidade, para retirar toda a rosca deixando a barra lisa. Na sequência, foi realizado um furo de 7 mm, como indica a Figura 3 (a). O furo foi efetuado para a passagem dos cabos pela barra rosca, como mostra a Figura 3 (b). É importante salientar que a região do furo foi arredondada, para evitar qualquer superfície de corte do cabo de aço. Para prender o laço desenvolvido, foi efetuada uma prensagem com terminal para cabos elétricos, como indica a Figura 3 (c), tornando a união com espessura aproximada de 20 mm. Em função disso, foi executado um aumento na região do sulco onde o terminal do cabo estava localizado, para um melhor contato entre o cabo de aço e a madeira. Assim que unidos o cabo e a barra rosca, o comprimento final dos materiais foi de 2,30 m, sendo 1,90 m de comprimento livre do cabo de aço e 0,20 m de barra rosca em cada extremidade, colocados uniformemente na viga de madeira, de forma a se obter igualdade entre as amostras.

Figura 3 – União da barra rosca com o cabo de aço: (a) extremidade da barra esmerilhada, (b) passagem para cabos, (c) terminal prensado



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os cabos foram ancorados à viga através de porcas sextavadas de 15,88 mm. Para evitar danos na superfície entre a porca e a madeira, foram desenvolvidas chapas de aço em oficina metalúrgica,

de 80 x 80 mm com 3 mm de espessura, e realizados dois furos de 17 mm para a passagem da barra roscada, como indica a Figura 4.

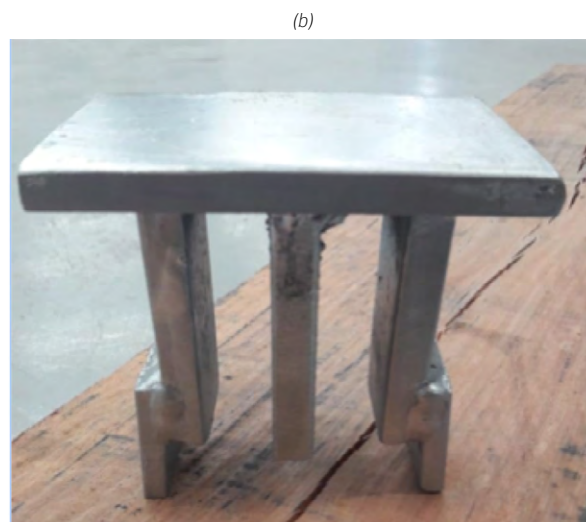
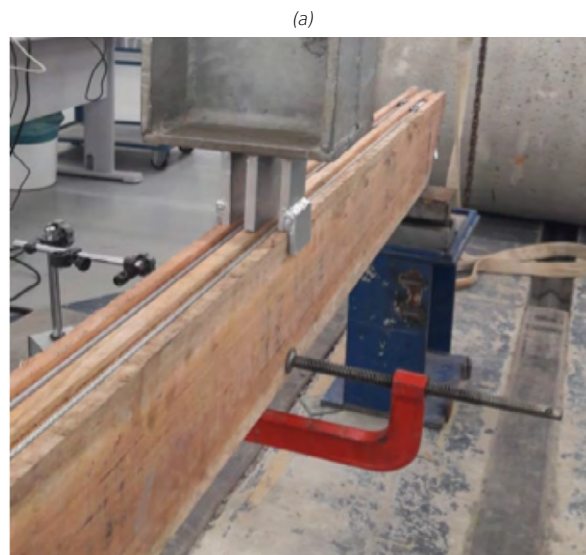
Figura 4 – Chapa de aço para evitar danos na madeira



Fonte: Elaborada pelos autores.

A protensão foi realizada através do rosqueamento das porcas, a partir de uma metodologia desenvolvida pelos próprios autores. Inicialmente a viga foi submetida à flexão, no equipamento utilizado para flexão estática a quatro pontos, na superfície inferior, onde os cabos estavam situados, gerando um deslocamento de 0,5 cm, limitado à aplicação da carga, como indica a Figura 5 (a). Para permitir o deslocamento, foi realizado um suporte, conforme mostra a Figura 5 (b), que proporcionasse apertar os cabos sem que o apoio prejudicasse a protensão, quando em contato com esses. Posteriormente ao deslocamento, os cabos foram rosqueados até estarem completamente estirados, correspondendo a uma distância de cerca de 2 mm entre a base da viga e o cabo de aço, controlados pela distância de rosqueamento. Em seguida, a viga foi colocada em sua posição original. A força de protensão aplicada foi mantida em todas as vigas, através da contra-flecha de 0,5 cm, porém não foi possível mensurá-la, por falta de equipamento específico.

Figura 5 – Deslocamento vertical na superfície inferior: (a) posicionamento da viga, (b) apoio para aplicação da carga



Fonte: Elaborada pelos autores.

O último ensaio em que as vigas foram submetidas foi o de flexão estática a quatro pontos. Esse ensaio consiste em medir o deslocamento vertical e a máxima carga suportada na viga através de sensores de deslocamento linear (LVDT), que medem o deslocamento vertical da viga no centro do vão.

A viga foi posicionada sobre dois roletes que simulam apoios de primeira classe, posicionados a 5 cm da extremidade da viga. Logo, o vão livre adquirido foi de 190 cm. A amostra recebeu a carga através de dois pontos localizados nos terços do comprimento, aproximadamente 63,33 cm a partir dos apoios. Essa carga foi transmitida à viga através de um macaco hidráulico e uma célula de carga com capacidade de

leitura de 500 kN, que mensura a força aplicada nos pontos. Tanto os sensores de deslocamento linear quanto a célula de carga são interligados ao sistema de aquisição de dados, QuantumX MX840A de 8 canais, com interface ao software computacional CatmanEasy, ambos da empresa HBM. Para que as deformações causadas pelas reações de apoio não influenciassem nos resultados, foi utilizado um pórtico de reações, que possuía rigidez suficiente para que isso não ocorresse.

Como meio de análise e especificação dos dados, as vigas protendidas foram nomeadas em P1, P2 e P3 e as referências em R1, R2, e R3.

3 Resultados finais

O comportamento da espécie de *Eucalyptus* em relação à umidade demonstrou resultado médio de 59,35%, com desvio padrão de 0,08 %, conforme expresso na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Umidade

Amostra	Massa inicial média (g)	Massa seca média (g)	Percentual de umidade (%)
R1	33,79	22,85	47,88
R2	38,02	23,93	58,88
R3	34,79	20,76	67,58
P1	35,30	21,45	64,57
P2	31,41	20,49	53,29
P3	35,85	21,87	63,92
Média			59,35
D.P			0,08

Fonte: Elaborada pelos autores.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), a madeira com umidade em torno 60% pode ser classificada como madeira verde. Segundo os autores, a resistência acima do ponto de saturação das fibras (PSF) da madeira (30%) é praticamente constante e aumenta conforme ocorre a diminuição do teor de umidade, contudo, acima do PSF o volume e o peso específico não são influenciados. Isso é confirmado por Winandy e Rowel (2005). Consoante os autores, no ponto de saturação da fibra da madeira existe água acumulada na cavidade celular da madeira (água livre) que não interfere significativamente nas propriedades mecânicas. No entanto, abaixo desse ponto a água na parede celular das fibras (água de impregnação) acaba afetando sensivelmente a resistência. Isso ocorre

porque há uma redução das ligações por pontes de hidrogênio, entre os polímeros orgânicos presentes nas paredes celulares.

Apesar da alta umidade, essa propriedade aumenta a magnitude da recuperação da deformação (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010), sendo uma importante característica, visto que a protensão tende a aplicar esforços à madeira, gerando deslocamento como a contra-flecha, sem causar danos de tração à superfície. Portanto, é ideal que ela apresente certa capacidade de recuperação elástica.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos no ensaio de densidade básica. De acordo com os resultados atingidos, as vigas possuem densidade média de 747,55 kg m⁻³. Conforme Oliveira, Hellmeister e Tomazello (2005), a determinação da densidade é fundamental para avaliar a qualidade da madeira e essa propriedade pode variar dentro da própria árvore, tanto no sentido radial, da medula para a casca, quando na direção base-topo. Uma madeira com densidade mais homogênea no interior do tronco processa uma maior uniformidade das propriedades mecânicas.

Tabela 2 – Densidade básica

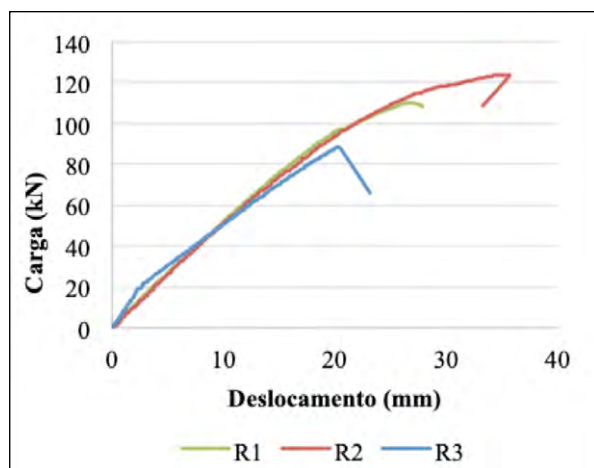
Amostra	Densidade (kg.m ⁻³)
R1	758,61
R2	767,40
R3	731,17
P1	748,13
P2	703,36
P3	776,56
Média	747,55
Desvio padrão	26,76

Fonte: Elaborada pelos autores.

Segundo Oliveira e Silva (2003), a espécie *Eucalyptus* tem um rápido crescimento e apresenta, durante a secagem, uma contração volumétrica excessiva, provocando fendilhamentos e empenamentos, podendo esses defeitos ser maiores em espécies com menores densidades. Os mesmos autores confirmam que a variação da densidade depende da localização no tronco e, também, das proporções dos vasos contidos e das espessuras das paredes celulares das fibras. A densidade pode aumentar se houver um crescimento maior das espessuras das paredes celulares, ou diminuir com o aumento da proporção dos vasos em relação às paredes das fibras.

A Figura 6 representa graficamente as curvas de carga-deslocamento das vigas referências obtidas no ensaio de flexão a quatro pontos. É possível observar que a rigidez se mantém constante com o acréscimo de carga e deflexão, até o ponto de ruptura.

Figura 6 – Gráfico carga x deslocamento das vigas referência (R1-R3)



Fonte: Elaborada pelos autores.

A viga de referência 1 (R1) manteve a deformação constante em função da carga até o limite da resistência, em aproximadamente 110,28 kN, onde ocorreu a ruptura aos 26,84 mm. Já a viga R2 teve comportamento similar à viga R1 até aproximadamente 100 kN. Posterior a essa carga, a segunda viga ainda teve um acréscimo até os 123,70 kN, com deflexão de 34,76 mm. A última viga referência ensaiada (R3) apresentou carga e deformação constantes, até alcançar o limite de resistência em 84,91 kN, com deflexão em 20,86 mm.

Para o limite de deslocamento imposto pela NBR 7190 (ABNT, 1997), de $L/200$, as vigas R1, R2 e R3 alcançaram a deflexão com carga de aproximadamente 52,15, 51,50 e 50,68 kN, respectivamente. Já para o limite imposto pelo EUROCODE 5 (CEN, 2004), de $L/250$, as cargas se aproximaram de 42,14, 41,40 e 42,64 kN sucessivamente para as vigas R1, R2 e R3.

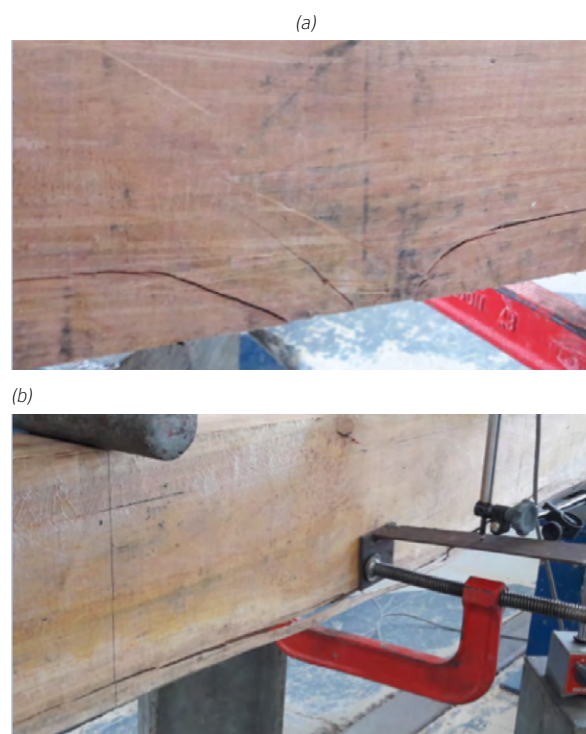
É possível perceber uma resistência de ruptura da R3 menor, quando comparada às outras vigas referências. No entanto, quando é equiparado o carregamento e a deflexão, de acordo com os limites impostos de $L/200$ e de $L/250$, os valores entre R1, R2, e R3 são próximos.

A falha verificada na viga de referência 1 (R1) ocorreu em um nó localizado na lateral da viga, na região tracionada, como indica a Figura 7 (a). De

acordo com Carreira e Dias (2006), a região onde estão localizados os nós provocam desvios na direção das fibras, com inclinações excessivas. Logo, a região onde o nó está situado influencia nos resultados mecânicos, principalmente se localizado na área tracionada, pois no nó as tensões normais de tração em relação às fibras provocam o enfraquecimento, devido à baixa resistência à tração da madeira. No entanto, de acordo com os resultados obtidos no ensaio, a presença do nó não influenciou expressivamente na resistência à flexão, por ter apresentado comportamento similar, principalmente com relação à viga R2. Segundo estudo realizado por Silva (2018), a presença de nós e o tamanho desses também não influenciaram nos resultados de ensaios mecânicos, principalmente no módulo de elasticidade e rigidez, contudo, as formas de ruptura dos corpos de prova flexionadas se apresentaram na região localizada do nó.

A viga R2 ainda sofreu pequena falha na outra face lateral, ainda na região tracionada, como demonstra a Figura 7 (b), indicando uma fissura por tração desviada, de acordo com a norma técnica ASTM D-143 (ASTM, 2007). Esse tipo de ruptura ocorre devido a um desvio das fibras no eixo longitudinal da viga, mesmo sem ser evidente a partir de uma verificação visual.

Figura 7 – Ruptura viga de referência 1 (R1): (a) ruptura no nó, (b) tração desviada



Fonte: Elaborada pelos autores.

A viga R2 não atingiu a ruptura, o ensaio foi interrompido devido à verificação de tendência ao tombamento. Como a resistência à flexão no momento estava relativamente alta, optou-se em parar o ensaio. Além disso, houve um esmagamento de pequena profundidade na região comprimida da viga no apoio localizado no terço do comprimento, como indica a Figura 8. Segundo Cunha (2013), o tombamento de vigas pode ser analisado devido à ocorrência de deformações localizadas nas regiões dos apoios de maneira não proporcional e esse fato é gerado devido a não retilinearidade da madeira na base do apoio, ou devido a imperfeições de alinhamento no sistema de aplicação das forças.

Figura 8 – Esmagamento do apoio no terço do comprimento da viga referência 2 (R2)



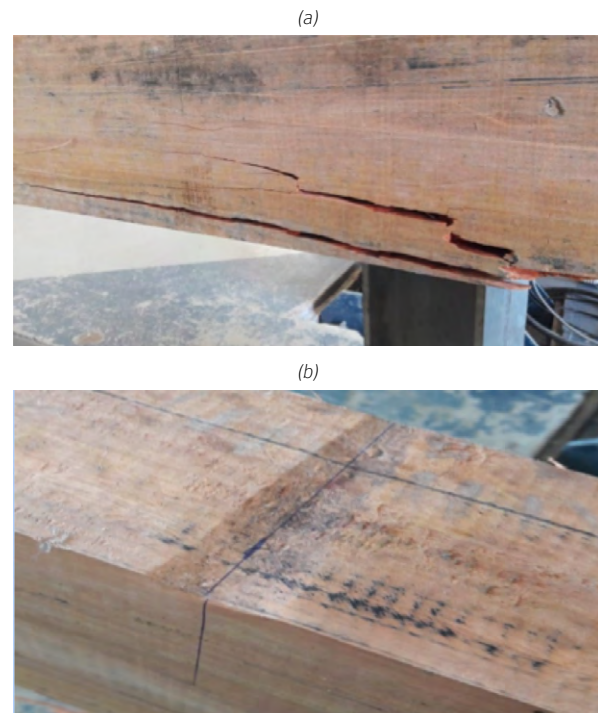
Fonte: Elaborada pelos autores.

A ruptura ocorrida na viga de referência 3 (R3) se deu por tração desviada, conforme indica a Figura 9 (a). Segundo estudo realizado por Rocha *et al.* (2017) sobre resistência à flexão em peças de eucalipto, dentre os corpos de prova ensaiados na flexão, 67% obtiveram falha por tração desviada e isso não impediu que o módulo de ruptura fosse maior para essas amostras. Além disso, a viga R3 também sofreu esmagamento do apoio no terço do comprimento da viga, como indica a Figura 9 (b). Isso ocorre devido ao fato de que quando a força de compressão é aplicada, ocorre o esmagamento das fibras e acontece de forma mais acentuada na região dos apoios, onde o esforço se encontra aplicado em uma menor área.

A Figura 10 ilustra graficamente as curvas carga-deflexão para as vigas protendidas (P1-P3). Para a viga P1 o caminho inicial foi linear, com carga e deslocamento constantes até alcançar a falha da madeira aos 20,31 mm com 106,31 kN. A viga P2 assumiu comportamento parecido, porém houve um

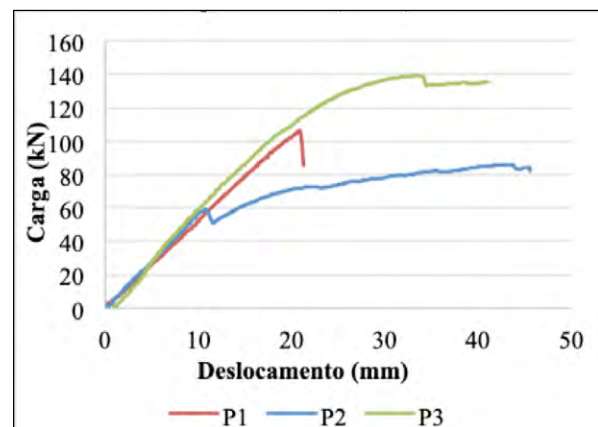
decréscimo de rigidez aos 10 mm e posterior aumento de carga até sua ruptura com deflexão de 43,47 mm e 86,09 kN. A viga P3 assumiu um comportamento não linear, aproximadamente parabólico, até a descontinuidade de crescimento de carga e a sua fratura com deslocamento de 40,92 mm e carga de 135,19 kN.

Figura 9 – Ruptura e esmagamento da viga de referência 3 (R3): (a) ruptura por tração, (b) esmagamento do apoio no terço de comprimento



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 10 – Curva carga x deslocamento das vigas protendidas (P1-P3)

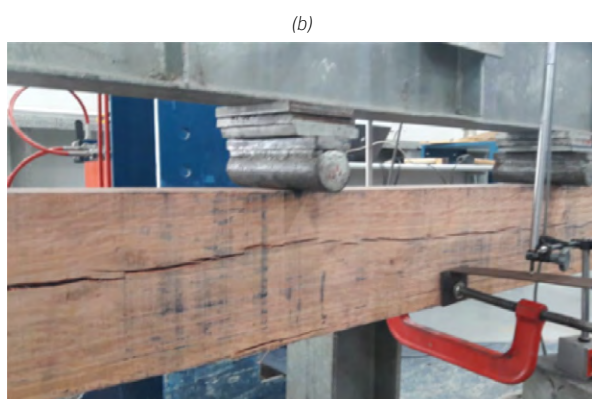
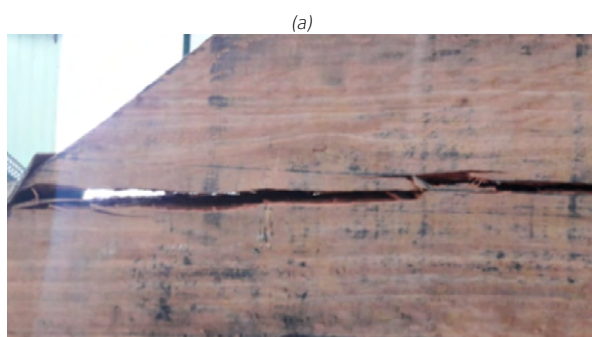


Fonte: Elaborada pelos autores.

Para o limite imposto pela NBR 7190 (ABNT, 1997), de $L/200$, sendo uma deflexão de 10 mm, as vigas P1, P2 e P3 obtiveram cargas de aproximadamente 52,68, 57,04 e 57,51 kN, respectivamente. E para a margem de $L/250$, que corresponde a um deslocamento de 8 mm, as cargas foram 41,83, 44,92 e 47,59 kN, para as vigas protendidas P1, P2 e P3, nessa ordem.

O modo de rompimento das vigas protendidas influenciou nos resultados obtidos. A amostra P1 sofreu cisalhamento na linha neutra. De acordo com Fiorelli (2002), esse tipo de ruptura ocorre inicialmente na seção comprimida, levando a uma consequente, abaixo da linha neutra, rompendo por cisalhamento, sendo mais comuns em madeiras que já apresentam fendas ou resina próximas ao plano onde as tensões são nulas. As vigas, como dito anteriormente, se encontravam verdes, com alto teor de umidade. Durante a espera para realização dos ensaios, a referida viga abriu pequenas fendas devido à perda de umidade, ao longo da linha neutra até o orifício realizado para a passagem das barras roscadas, e essa fenda se intensificou durante o ensaio, ocorrendo a falha nessa região. A Figura 11 (a) e (b) mostra a **fenda intensificada da viga P1**.

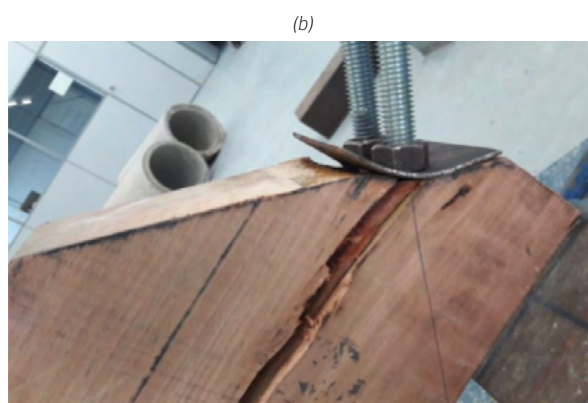
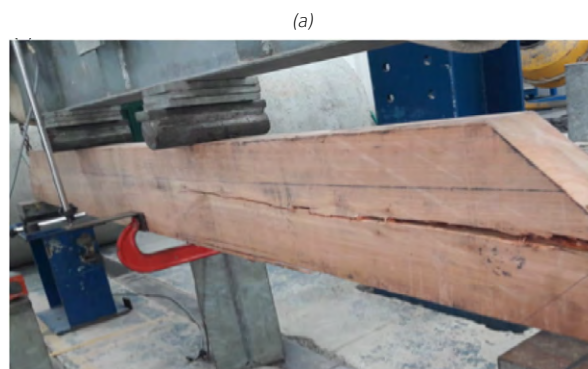
Figura 11 – Ruptura da viga protendida 1 (P1): (a) ruptura cortando seção transversal, (b) cisalhamento da linha neutra



Fonte: Elaborada pelos autores.

A viga P2 sofreu o mesmo tipo de ruptura observado na viga P1. Antes do ensaio a amostra também se encontrava com fenda na área dos furos para a passagem da barra roscada e durante a flexão a rachadura se intensificou, conforme mostra a Figura 12 (a), provocando a falha no carregamento e deslocamento. Durante o ensaio, as vigas P1 e P2 tinham determinada resistência em afastar a linha neutra, devido à chapa de aço aderida, como pode ser percebido na Figura 12 (b), onde a chapa se encontra flexionada.

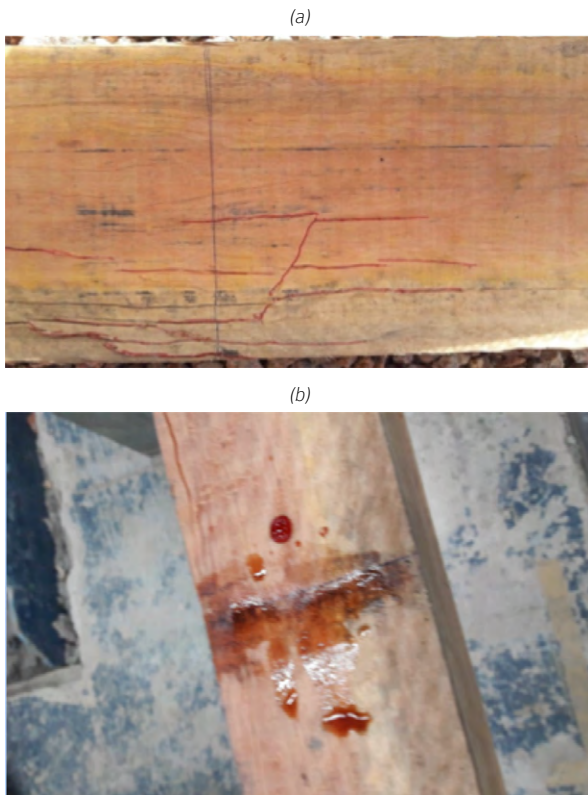
Figura 12 – Ruptura da viga protendida 2 (P2): (a) ruptura da linha neutra, (b) chapa de aço flexionada



Fonte: Elaborada pelos autores.

O rompimento sofrido pela viga P3 foi por tração simples, como indica a Figura 13 (a). O colapso por tração simples ocorre após ser iniciado o esmagamento das fibras por compressão e consequente aumento da área comprimida e redução da seção tracionada, provocando a ruptura por tração. A viga se encontrava íntegra sem nenhuma fenda, com alta umidade, ocorrendo a liberação de resina ou seiva na área do apoio localizado no terço médio do comprimento que, após seca adquiriu consolidação vítrea. Essa liberação foi provocada devido à compressão localizada em pequena área, como mostra a Figura 13 (b).

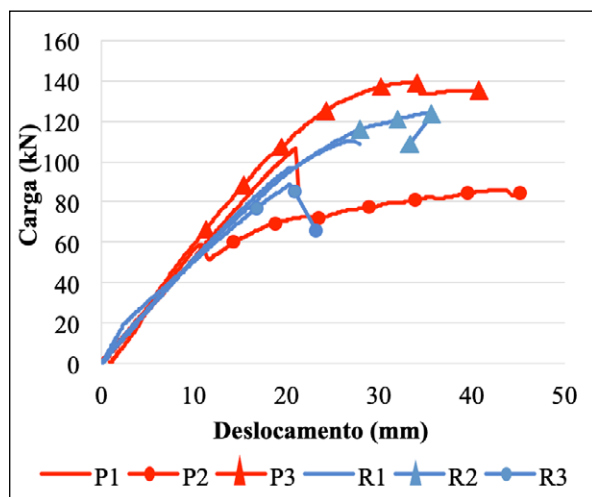
Figura 13 – Ruptura da viga protendida 3 (P3): (a) ruptura por tração simples, (b) resina da madeira



Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 14 ilustra o comportamento das curvas carga-deslocamento para as seis amostras estudadas.

Figura 14 – Curvas carga-deslocamento para as amostras estudadas



Fonte: Elaborada pelos autores.

É possível perceber, a partir da Figura 14, o aumento da deformação das vigas protendidas P2 e P3, passando de uma ruptura no estado frágil para uma ruptura dúctil. Pode-se verificar que a protensão realizada provocou o acréscimo de tensões a partir de aproximadamente 7 mm, onde o aço começou a ser solicitado. Na viga P2 também é observada uma redução da rigidez em aproximadamente 10 mm, onde possivelmente houve a acomodação do cabo de aço na madeira perdendo protensão e, conseqüentemente, diminuído a carga na deflexão. Negrão (2012), anteriormente citado, realizou protensão em vigas laminadas coladas e verificou também a passagem de ruptura frágil para ruptura dúctil, indicada pelo aumento da deformação, confirmada também pelos autores De Luca e Marano (2012), que efetuaram protensão utilizando também madeira laminada colada e adesivo poliuretano e perceberam aumento de ductilidade após a falha.

A forma de protender as vigas para que houvesse garantia de uniformidade nas três amostras (P1-P3) foi através da contra-flecha realizada de 5 mm, onde as vigas apresentavam 50 kN de carga e era necessário conter a força do ensaio em função da pequena área de contato e, conseqüentemente, alta tensão que era proporcionada pela peça de apoio indicada na Figura 5 (b) no centro dos vãos, criando deformação nesse ponto, como indica a Figura 15.

Figura 15 – Contato do apoio central na superfície inferior da viga para execução da contra-flecha



Fonte: Elaborada pelos autores.

O dano na interface de contato entre a madeira e o cabo de aço foi significativo, manifestado pelo aumento do orifício e desprendimento das fibras da madeira, sendo uma indicação de que houve perda de protensão para que houvesse esse acomodamento, conforme demonstra a Figura 16.

Figura 16 – Danos na interface de contato entre a madeira e o terminal prensado



Fonte: Elaborada pelos autores.

Conforme os resultados anteriormente descritos sobre as vigas referências e as vigas protendidas, foi possível compará-los e analisá-los de acordo com a Tabela 3.

Como método para avaliar se houve diferença significativa entre os grupos ensaiados, empregou-se o método estatístico de análise de variância (ANOVA) com nível de confiabilidade de 95%, sendo assim um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). A partir dos dados contidos na Tabela 3, a estatística mostrou que houve diferença significativa para a carga no limite de deflexão em L/200, através do acréscimo entre as médias das cargas das vigas protendidas em relação às vigas referências em 8,36%. Para o limite de L/250, não houve estatisticamente significância, com incremento de 6,47% entre as médias das cargas para esse deslocamento, e entre a força na ruptura, a diferença de 2,73% também se mostrou insignificativa.

Tabela 3 – Comparação de resultados

Amostra	Carga no limite de deslocamento L/200 (kN)	Carga no limite de deslocamento L/250 (kN)	Na ruptura	
			Carga (kN)	Deslocamento (mm)
R1	52,15	42,14	110,28	26,84
R2	51,50	41,40	123,70	34,76
R3	50,68	42,64	84,91	20,86
Média	51,44	42,06	106,30	27,49
Desvio Padrão	0,74	0,62	19,70	6,97
P1	52,68	41,83	106,31	20,31
P2	57,04	44,92	86,09	43,47
P3	57,51	47,59	135,19	40,92
Média	55,74	44,78	109,20	34,90
Desvio Padrão	2,66	2,88	24,68	12,70
Incremento entre resultados médios: protendidas/ referências	8,36%	6,47%	2,73%	26,96%

Fonte: Elaborada pelos autores.

4 Conclusões

Por meio dos resultados obtidos na pesquisa é possível constatar que o uso de protensão para reduzir o deslocamento vertical em vigas de madeira se mostrou com efeito significativamente positivo, em comparação com vigas não protendidas. O acréscimo da carga no deslocamento limite

estabelecido pela norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) foi de aproximadamente 8,36%, se mostrando estatisticamente significativo quando comparado às vigas referências. Com base nesse resultado, obteve-se uma breve redução do deslocamento vertical com este estudo.

Contudo, com relação ao limite imposto pelo EUROCODE 5 (CEN, 2004), o aumento de carga foi

de aproximadamente 6,47%, não demonstrando ter diferença significativa de acordo com o método de análise de variância, bem como a carga suportada na ruptura das vigas protendidas foram maiores que nas vigas referências em 2,73%.

A madeira da espécie *eucalyptus* tem grande facilidade em apresentar fendilhamentos e empenamentos, principalmente quando perde umidade em ambiente não controlado, estando duas das amostras a serem protendidas com elevado fendilhamento na linha neutra, devido a uma maior exposição à secagem, em virtude de estarem localizadas em posição de maior contato com o ar, prejudicando o ensaio de flexão, enquanto a amostra sem esse defeito teve um comportamento mais satisfatório.

A modelagem utilizada para realização da protensão se mostrou eficiente, porém a união do cabo de aço com a barra roscada utilizando um terminal prensado prejudicou a protensão, criando perdas da mesma devido à acomodação na madeira quando estava sendo rosqueada e durante o ensaio de flexão a quatro pontos, sendo ideal uma tubulação para passagem dos cabos de maneira que evite o contato entre os materiais.

A forma de protender a viga aplicando inicialmente uma contra-flecha foi prejudicada devido a dificuldades ao descarregar a carga no apoio confeccionado, visto que a pequena área de contato e alta tensão afetou a aplicação de uma maior contra-flecha e, conseqüentemente, maior protensão. Também foi possível perceber que por se tratar de uma baixa magnitude (5 mm), a contra-flecha foi totalmente absorvida, não restando deslocamento negativo.

Devido à dificuldade de uma maior protensão, os cabos somente foram solicitados após uma deformação de aproximadamente 7 mm. Portanto, não houve aumento de rigidez como o esperado. A partir dessa deflexão é possível perceber aumento da curva carga-deslocamento em relação às vigas referências e, conseqüentemente, após a viga de madeira e o cabo deformarem juntos, houve um aumento de ductilidade, observado pela maior carga suportada e um acréscimo do deslocamento na ruptura.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. C.; OLIVEIRA, A. L. C. O.; CARRASCO, E. V. M. Propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Floresta e**

Ambiente, v. 24, abr. 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-80872017000100116&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 13 abr. 2020.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-143 – Standard methods of testing small clear specimens of timber. **Annual Book of ASTM Standard**. West Conshohocken: ASTM, 2007. 32 p.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Critérios para classificação visual de peças estruturais de *pinus sp.* **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 8, n. 34, p. 17-43, 2006.

CHEUNG, A. B. *et al.* Confiabilidade estrutural de uma ponte protendida de madeira considerando o tráfego real. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 221-232, abr./jun. 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-86212017000200221&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 13 abr. 2020.

CUNHA, T. A. **Utilização de viga vagão formada por peças retangulares de madeira para sustentação de fôrmas para concreto**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

DE LUCA, V.; MARANO, C. Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 206-217, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811006465>. Acesso em: 13 abr. 2020.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EUROCODE 5 – Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

FERNANDES, J. G.; BRANCO, J. M. A utilização sustentável das malhas estruturais de madeira. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 3., 2018, Coimbra. **Anais...** Coimbra: Universidade de Coimbra, 2018. p. 1-10.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado

em Ciência e Engenharia de Materiais) –
Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison: U.S. Department of Agriculture: Forest Service: Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual Ibá**. São Paulo: Ibá, 2020. 66 p.

LIMA, L. C. C. D.; COSTA, A. A.; RODRIGUES, C. F. Reforço estrutural de vigas de madeira com soluções de pré-esforço. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, n. 6, p. 41-52, mar. 2018.

MCCONNELL, E.; MCPOLIN, D.; TAYLOR, S. Post-tensioning of glulam timber with steel tendons. **Construction and Building Materials**, v.73, p.426-433, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814010952>. Acesso em: 13 abr. 2020.

NEGRÃO, J. H. Prestressing systems for timber beams. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 12., 2012, Auckland. **Anais...** Auckland: [s.n.], 2012.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMMEISTER, J. C.; TOMAZELLO, M. F. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622005000100013&script=sci_arttext. Acesso em: 13 abr. 2020.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA J. C.; Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *eucalyptus saligna sm*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.381-385, 2003. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622003000300015&script=sci_arttext&lng=pt. Acesso em: 13 abr. 2020.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224p.

ROCHA, S. M. G. *et al*. Resistência a flexão em peças de madeira de eucalipto para produção de estofados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 3., 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBCTEM, 2017. p. 1-9.

SILVA, J. C. **Parâmetros construtivos para painéis verticais adaptados do sistema wood frame em**

madeira de eucalipto jovem. 2018. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

SORIANO, J.; PELLIS, B. P.; MASCIA, N. T. Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars. **Composite Structures**, n. 150, p. 200-217, mai. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316304925>. Acesso em: 13 abr. 2020.

VIDAL, J. M. *et al*. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 257-271, jan./mar. 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-50982015000100257&script=sci_abstract&lng=es. Acesso em: 13 abr. 2020.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. Chemistry of Wood Strength. In: ROWELL R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. U. S: CRC Press, 2005. p. 305-343.