

Submetido 31/01/2025. Aprovado 03/09/2025

Avaliação: revisão duplo-anônimo

Pilares curtos de madeira cintados com microconcreto armado

SHORT WOODEN PILLARS CONFINED WITH REINFORCED MICRO CONCRETE

PILARES CORTOS DE MADERA ARRIOSTRADOS CON MICROHORMIGÓN ARMADO

Luca Jamal da Matta

Universidade Federal de Goiás (UFG)

luca12m@hotmail.com

Suzane Cavalcante Marques

Universidade Federal de Goiás (UFG)

suzanecavalcantem@gmail.com

Matheus Peres Chagas

Universidade Federal de Goiás (UFG)

mpchagas@ufg.br

Edgar Bacarji

Universidade Federal de Goiás (UFG)

edgar@ufg.br

Resumo

Os sistemas estruturais do tipo madeira-concreto são importantes na engenharia de estruturas em razão do melhor aproveitamento das propriedades mecânicas de cada material, isto é, da boa resistência da madeira à flexão, e do concreto à compressão. O presente trabalho investigou o comportamento de corpos de prova de madeira cintados com microconcreto armado quando submetidos à compressão centrada, avaliando o efeito do cintamento na resistência à compressão e no módulo de elasticidade. Foram utilizadas peças de madeira roliça com diâmetros entre 7 cm e 12 cm, e com altura de 30 cm, envolvidas com estribos helicoidais e concretadas com microconcreto autoadensável. Avaliaram-se os corpos de prova sem cintamento, tomados como referência, e variaram-se os espaçamentos das hélices em 3, 5, 7 e 9 cm. Estudou-se também uma formulação analítica para a estimativa das resistências em função do cintamento dos corpos de prova, adaptada da formulação clássica de pilares de concreto cintados. Analisados os resultados, observou-se que o efeito de cintamento foi eficaz para a madeira, com o aumento da resistência à medida que os espaçamentos entre os estribos diminuíram. Para o melhor resultado, com espaçamento de 3 cm, obteve-se um aumento de 46% em relação aos corpos de prova de referência. Notou-se, ainda, um ganho de rigidez na estrutura, pela avaliação do módulo de elasticidade. Por fim, verificou-se que a adaptação analítica conduziu a resultados bem próximos aos verificados experimentalmente, com variação média de 2,49% quanto aos resultados experimentais.

Palavras-chave: eucalipto; microconcreto; cintamento; propriedades mecânicas.

Abstract

Composite wood-concrete structural systems are important in structural engineering because they make more efficient use of the mechanical properties: the high bending resistance of wood and the high compressive strength of concrete. The present work investigated the behavior of wooden specimens

confined with reinforced micro concrete under axial compression, evaluating the effect of confinement on compressive strength and modulus of elasticity. Roundwood pieces with diameters between 7 cm and 12 cm and a height of 30 cm were selected; these pieces were confined with helical stirrups and concreted with self-compacting microconcrete. Unconfined specimens were evaluated and taken as reference, and the helical spacing varied at 3, 5, 7, and 9 cm. An analytical formulation for estimating strength as a function of confinement of the test specimens was also studied, adapted from the classic formulation of confined concrete columns. After analyzing the results, it was observed that the confinement was effective for wood, with increased compressive strength as the spacing between the stirrups decreased. For the best result, with a spacing of 3 cm, a 46% increase compared to the reference specimens. An increase in stiffness was also observed through evaluating the modulus of elasticity. Finally, it was found that the analytical adaptation led to results very close to those verified experimentally, with an average deviation of 2.49% relative to the experimental values.

Keywords: eucalyptus; micro concrete; confinement; mechanical properties.

Resumen

Los sistemas estructurales de madera y concreto son importantes en la ingeniería de estructuras debido al mejor aprovechamiento de las propiedades mecánicas de cada material, es decir, la buena resistencia de la madera a la flexión y del concreto a la compresión. El presente trabajo investigó el comportamiento de muestras de madera reforzadas con microconcreto armado cuando sometidas a compresión centrada, evaluando el efecto del refuerzo en la resistencia a la compresión y en el módulo de elasticidad. Se utilizaron piezas de madera redonda con diámetros entre 7 cm y 12 cm y una altura de 30 cm, envueltas con estribos helicoidales y concretadas con microconcreto autodensificable. Se evaluaron las muestras sin refuerzo, tomadas como referencia, y se varió la separación entre las hélices en 3, 5, 7 y 9 cm. También se estudió una formulación analítica para estimar las resistencias en función del cinturado de los cuerpos de las muestras, adaptada de la formulación clásica de pilares de concreto cintados. Tras analizar los resultados, se observó que el efecto del cinturado fue eficaz para la madera, con un aumento de la resistencia a medida que disminuía la separación entre los tirantes. Para obtener el mejor resultado, con una separación de 3 cm, se obtuvo un aumento del 46 % en relación con los cuerpos de prueba de referencia. También se observó un aumento de la rigidez de la estructura, según la evaluación del módulo de elasticidad. Por último, se comprobó que la adaptación analítica condujo a resultados muy similares a los obtenidos experimentalmente, con una variación media del 2,49 % con respecto a los resultados experimentales.

Palabras clave: eucalipto; microconcreto; cintado; propiedades mecánicas.

Introdução

O sistema estrutural composto por madeira e concreto é destaque na engenharia de estruturas, pois aproveita as melhores propriedades de cada material: a boa resistência da madeira à flexão, e do concreto à compressão (Dias, 2018). Fazendo uso dessa melhora no comportamento mecânico, Ceccotti (2002) estudou lajes mistas de concreto e madeira, formadas por uma grelha de vigas em formato de “T”. Concluiu que elas suportam até o triplo da carga e que têm rigidez seis vezes maior do que as lajes de madeira.

O concreto figura, hoje, como o material de construção mais utilizado no mundo (Science Museum, 2021). A ampla utilização se deve à sua durabilidade, alta trabalhabilidade e grande disponibilidade a um baixo custo (Metha; Monteiro, 2014). Quando foi associado ao aço, ainda no século XIX, sua baixa resistência à tração foi solucionada

e as peças de concreto armado ganharam mais resistência e ductilidade (Bastos, 2019). O microconcreto, por sua vez, diferenciado do concreto convencional por não utilizar o agregado graúdo em sua composição, vem sendo estudado e apresenta-se com várias possibilidades de aplicações, mormente em situações em que o concreto convencional se torna tecnicamente inviável (Silva *et al.*, 2018; Machado; Bacarji; Carasek, 2023).

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos utilizados pelo homem. Atualmente, é considerada um produto normatizado, amplamente cultivado e com fins mercadológicos. Sua comercialização está alinhada com políticas ambientais que preconizam a madeira proveniente de plantios.

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) (2022), em 2021 a área de florestas plantadas no Brasil era de 9,93 milhões de hectares, sendo o eucalipto responsável por 75,8% da área plantada. Esse gênero recebe o destaque nas plantações por ter alta adaptação de suas espécies a variados tipos de clima, rápido crescimento, ciclos de corte entre 5 e 12 anos e alta produtividade (Bentes-Gama, 2006). Quando passado por tratamento preservativo, sua durabilidade é aumentada de tal forma que sua vida útil pode chegar a 25 anos (Francischinelli, 2006), associada principalmente às características do ambiente de uso.

Quanto aos pilares, são peças de fundamental importância na estrutura de uma construção, uma vez que são eles que recebem os esforços provenientes das vigas ou lajes e os transferem às fundações. Em determinadas situações de projeto, em que há necessidade de pilares circulares de diâmetro pré-fixado, com dimensionamento normativo do concreto armado incapaz de resistir às cargas, uma solução é o cintamento do pilar, que consiste em envolvê-lo com estribos circulares, devidamente espaçados e que absorverão os esforços decorrentes de alongamento transversal, proporcionando um aumento de resistência do pilar original.

Considerando a importância dos pilares para o sistema estrutural das edificações e o bom desempenho da madeira e do concreto, bem como a importância da sustentabilidade na construção civil, a utilização de pilares circulares mistos do tipo madeira-concreto surge como uma possibilidade técnica e ambientalmente promissora, especialmente quando se utiliza madeira oriunda de plantios comerciais.

Objetivos

Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é estudar o comportamento de pilares curtos de madeira cintados com microconcreto armado, variando-se o espaçamento dos estribos.

Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento dos pilares mistos cintados quando expostos à compressão axial.
- Analisar a rigidez dos pilares quando submetidos ao cintamento.
- Estudar espaçamentos do cintamento que apresentam melhores resultados.
- Propor uma formulação analítica para estimativa da carga de compressão última dos pilares cintados.

Justificativa

Com a utilização da madeira de eucalipto de plantio, um material sustentável e com boas propriedades mecânicas, considerado uma alternativa à madeira de espécies nativas, o presente trabalho se justifica pela preocupação com a questão ambiental. Nesse sentido, destaca-se a importância da redução da quantidade de concreto empregado no elemento estrutural em relação a um pilar de concreto, que implica uma redução no consumo de cimento. Consequentemente, há uma diminuição das emissões de na atmosfera, haja vista que a produção mundial de cimento é responsável por 5% a 8% da emissão de todo o dióxido de carbono no planeta (Khaiyum; Sarker; Kabir, 2023). Quanto ao aspecto da durabilidade, o concreto fornecerá uma capa de proteção à madeira, aumentando sua vida útil. O trabalho se justifica também pelo aspecto econômico, por abordar o uso em construções de um material de menor massa específica do que o concreto convencional, evidenciando uma redução do peso, o que, em uma situação prática, contribuirá para a adoção de fundações mais econômicas.

Fundamentação teórica

A seguir são abordados alguns tópicos relacionados à madeira, ao microconcreto autoadensável e ao cálculo de pilares cintados de concreto, que embasam o presente trabalho.

Especificidades da madeira

A madeira é um material biológico que cresce, vertical e radialmente, em velocidade e proporções que variam com as condições climáticas e a espécie (Calil Jr.; Brito, 2010), entre outros fatores. Dentre as propriedades físicas naturais da madeira destacam-se a anisotropia e a umidade. A anisotropia surge porque as células constituintes responsáveis pela estruturação da madeira, especialmente as fibras e traqueídes, são dispostas longitudinalmente ao tronco, definindo a principal direção de resistência da madeira paralela a essas fibras. Já a umidade é o teor de água em relação ao peso da madeira seca, que pode estar localizada tanto no vazio, dentro das células (lumens), entre elas ou ligadas quimicamente à parede celular dos elementos anatómicos. Quando o tronco é cortado e posto para secar, sua umidade diminui até atingir o ponto de saturação das fibras (PSF) – aproximadamente 28% –, quando a água livre nos vazios evaporou completamente, mas a parede celular dos elementos continua saturada. A partir desse ponto, a secagem continua naturalmente, até atingir equilíbrio com o ambiente externo, devido à propriedade de higroscopia. Abaixo do PSF ideal, a madeira começa a sofrer retrações, perda de massa, redução do volume e variações de suas propriedades físicas e mecânicas, a exemplo da resistência (Pfeil; Pfeil, 2003).

EUCALIPTO

Eucalipto (*Eucalyptus sp.*) é o nome comum dado às mais de 700 espécies arbóreas da família *Myrtaceae*, originárias da Austrália (Levy, 2020). Algumas espécies do gênero botânico foram introduzidas no Brasil ainda no século XIX, mas o amplo cultivo e os estudos só começaram em 1904, no Horto de Jundiaí, com Edmundo Navarro de Andrade, que, à época, procurava uma fonte rápida de combustível para

as locomotivas (Antonangelo; Bacha, 1998). No entanto, a produção brasileira da árvore só foi impulsionada com o Programa de Incentivos Fiscais ao Florestamento e Reflorestamento, entre os anos 1965 e 1988 (Bacha, 1993).

Atualmente, no país, o gênero *Eucalyptus* é o mais cultivado entre as espécies madeireiras, sendo o Brasil referência mundial em produtividade da espécie, com 38,9 m³/ha em 2021. A elevada produção está aliada à sua alta aplicação em diversos setores da indústria, como na produção de celulose, biocombustível e madeira para construção civil (Fernandes, 2020).

Com relação às suas propriedades mecânicas, o gênero *Eucalyptus* não tem nenhuma restrição de uso, visto que seu grande número de espécies apresenta resistências variando de baixas a elevadas (Revista da Madeira, 2001). No quesito durabilidade, a madeira de espécies nativas brasileiras tende a ser mais durável do que das espécies de plantio (Vivian *et al.*, 2012).

Microconcreto autoadensável

Microconcreto é um composto de cimento Portland agregado, com diâmetro máximo inferior a 12,5 mm, fíleres e aditivos plastificantes para controle da relação água-cimento (Silva *et al.*, 2018). A eliminação dos agregados graúdos do composto altera significativamente seu comportamento, uma vez que, sendo o agregado graúdo o maior constituinte de volume na mistura, as propriedades de módulo de elasticidade e a curva tensão-deformação podem apresentar valores diferentes para a mesma tensão de compressão, quando comparadas com concretos convencionais.

O concreto autoadensável, por sua vez, é de grande fluidez, podendo ser moldado *in loco* e não necessita de vibração para fazer um produto livre de vazios. É produzido com os componentes tradicionais do concreto, acrescidos de superplastificantes, aditivos modificadores de viscosidade e adições minerais finas, geralmente a sílica ativa. Essa composição altera consideravelmente o abatimento do concreto, que passa a ser mais bem avaliado pelo espalhamento, geralmente acima de 600 mm, permitindo o seu lançamento sem auxílio de vibradores. No entanto, devido à maior proporção cimento/agregado, a retração por secagem e térmica desses concretos tende a ser alta (Metha; Monteiro, 2014).

Pilares de concreto armado cintados

O cintamento consiste em envolver o núcleo de um pilar com uma camada de concreto e estribos transversais, podendo esses serem circunferências descontínuas ao longo do pilar ou um estribo helicoidal único (Takeuti, 1999). Seu formato é predominantemente circular, porque, como observou Pereira (2017), nessas seções circulares o núcleo está sujeito a uma distribuição de tensões uniformes, enquanto em seções retangulares as tensões se concentram nos cantos.

Pilares cintados são preferíveis quando é requerida maior ductilidade dos pilares ou quando seus diâmetros não podem ser alterados. Seu funcionamento deve-se à expansão lateral que o núcleo do pilar sofre quando submetido a uma compressão axial. Dessa forma, a armadura espiral é solicitada e começa a sofrer tração. Além disso, por ação e reação, confina o núcleo, provocando compressão triaxial, o que aumenta sua resistência (Wight; MacGregor, 2011). A ruptura ocorre em dois estágios: o primeiro quando a envoltória de concreto rompe e desprende-se das armaduras, deixando-as expostas, sem o rompimento do núcleo do pilar; o segundo quando a carga continua a aumentar, até que as deformações laterais ficam muito

pronunciadas e o aço dos estribos começa a escoar de maneira mais dúctil. Cabe também citar que pilares cintados apresentam uma carga de ruptura menor quando submetidos a carregamentos excêntricos, o que não os inviabiliza, pois ainda suportam grandes deformações (Wight; MacGregor, 2011).

DIMENSIONAMENTO

O equacionamento a seguir baseia-se em Süsskind (1987). As duas equações finais para o dimensionamento de um pilar cintado feito inteiramente de concreto são:

$$f_{cu} = f_{ck} \left(1 + 2 \frac{A_t}{A_{ci}} \times \frac{f_{yk}}{f_{ck}} \right) \times \left(1 - \frac{8e_{i+a}}{d_i} \right) \quad (1)$$

$$N_{d \text{ cintado}} = \frac{0,85}{\gamma_c} f_{cu} \times A_{ci} + f_{sd} \times A_s \quad (2)$$

Sendo f_{cu} e f_{ck} as tensões de compressão resistente do pilar e característica do concreto, respectivamente. Os parâmetros A_t e A_{ci} representam a área de seção da camisa de aço (cintamento) e do núcleo de concreto. Por sua vez, f_{yk} corresponde à tensão de escoamento do aço. Já f_{sd} representa a tensão de escoamento de cálculo do aço, enquanto e_{i+a} diz respeito à excentricidade inicial somada com a acidental. A refere-se ao diâmetro do núcleo de concreto, medido a partir do eixo da camisa de aço. $N_{d \text{ cintado}}$ se relaciona à força de compressão de cálculo suportada pelo pilar, enquanto γ_c se refere ao coeficiente de segurança das estruturas de concreto e, por fim A_s se relaciona à área de aço longitudinal.

Como a camisa de aço diz respeito a um modelo idealizado de cálculo, na prática, sendo substituído por estribo helicoidal, o diâmetro d_i e as áreas A_{ci} e A_t podem ser calculadas com auxílio das equações 3, 4 e 5, respectivamente.

$$d_i = d - 2 \left(c + \frac{\phi_t}{2} \right) \quad (3)$$

$$A_{ci} = \frac{\pi \times d_i^2}{4} \quad (4)$$

$$A_t = \frac{2,5 d_i \times \phi_t^2}{s} \quad (5)$$

Sendo d equivalente ao diâmetro total do pilar, c referente ao cobrimento das armaduras, ϕ_t ao diâmetro da barra do estribo e, por fim, s relacionado ao espaçamento entre estribos, duas importantes prescrições normativas devem ser observadas. A primeira é que não são admitidas excentricidades superiores a $\frac{d_i}{8}$ pela, anteriormente mencionada, baixa resistência do pilar cintado a momentos fletores. A segunda é que também não podem ser aceitos momentos de segunda ordem nos pilares, portanto apenas pilares curtos ($\lambda < \lambda_l$) podem ser cintados, sendo λ_l o índice de esbeltez limite proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014), não superior a 35. Tal consideração foi aplicada por Fusco (1981) em função do comprimento de flambagem do pilar e do diâmetro.

Nessa formulação foi considerado $\lambda = 40$; atualizando-se para o valor de 35, o valor limite passa a ser 8,75.

No cálculo da parcela resistente do concreto, não foi considerada a área do cobrimento porque a ruptura do cobrimento é brusca e deixa as armaduras expostas, de forma que perdem sua integridade, sendo assertivo o cálculo apenas do núcleo de concreto como resistente à carga.

Fusco (1981) ainda ressalta as recomendações normativas acerca de limites para dimensões das variáveis consideradas. Tais recomendações estão dispostas nas equações 6 a 10.

$$\phi_t \geq 5 \text{ mm}$$

(6)

$$s \geq \phi_t + 3 \text{ mm}$$

(7)

$$s \leq \left\{ \frac{d_i}{5} 8 \text{ cm} \right\}$$

(8)

$$0,005A_{ci} \leq A_t \leq 3A_s$$

(9)

$$N_{d \text{ cintado}} \leq 1,7N_{d \text{ não cintado}} \quad (10)$$

Materiais e métodos

Apresentam-se a seguir os materiais e métodos utilizados no trabalho.

Materiais

MADEIRA DE EUCALIPTO

O eucalipto utilizado foi da espécie *Eucalyptus grandis*, de cerca de 13 anos de idade, provenientes do sudeste do Mato Grosso. Foram usadas peças roliças, previamente descascadas, tratadas em autoclave com Cobre, Cromo e Arsênio (CCA), com retenção mínima de 6,5 kg/m³, e cortadas com 30 cm de altura. Os corpos de madeira foram separados em grupos de acordo com seu diâmetro médio: pequeno (diâmetros até 9,5 cm), médio (diâmetros entre 9,5 e 10,5 cm) e grande (diâmetros superiores a 10,5 cm). A Figura 1 mostra exemplares para cada grupo.

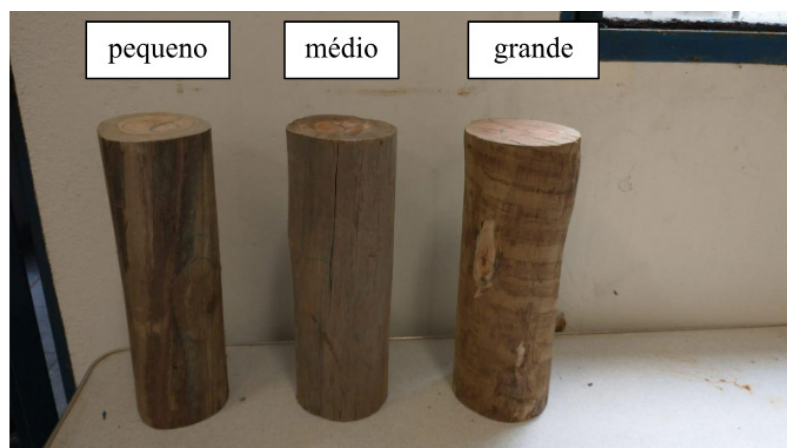


Figura 1 – Madeiras separadas por categoria de diâmetro

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Foram feitos os ensaios de densidade, umidade de equilíbrio com o ambiente, resistência à compressão axial e módulo de elasticidade à compressão, em conformidade com a NBR 7190-3 (ABNT, 2022), cujos resultados estão dispostos na Tabela 1.

Propriedade	Média ± Desvio padrão	Unidade
Umidade de equilíbrio	13,30 ± 0,42	%
Massa específica	744,16 ± 10,90	kg/m ³
Resistência à compressão	53,58 ± 5,65	MPa
Módulo de elasticidade	18,83 ± 3,45	GPa

Tabela 1 – Caracterização da madeira

Fonte: Os autores (2024).

MICROCONCRETO

O microconcreto autoadensável foi preparado com cimento CP-V ARI e sílica ativa como aglomerante (85% e 15%, respectivamente), fíler e areia, no traço de 1:0,3:1,7, em massa, e relação água/aglomerante de 0,6. Foi utilizado aditivo superplastificante no teor de 1,2% sobre a massa do aglomerante. Ainda no estado fresco, avaliou-se o espalhamento do microconcreto, que pode ser visto na Figura 2.



Figura 2 – Teste de espalhamento do microconcreto

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Os corpos de prova para caracterização foram moldados em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram feitos os ensaios de massa específica, em conformidade com a NBR 9778 (ABNT, 2005); de resistência à compressão, apoiado na NBR 5739 (ABNT, 2018); e módulo de elasticidade, fundamentado na NBR 8522 (ABNT, 2021). Os resultados da caracterização do concreto estão dispostos na Tabela 2.

Propriedade	Valores
Espalhamento (mm)	790
Massa específica (kg/m ³)	2.228
Resistência média à compressão (MPa)	28,69
Módulo de elasticidade médio (GPa)	16,76

Tabela 2 – Caracterização do concreto
Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

AÇO

Utilizou-se aço CA-60 em vergalhões de diâmetro 5 mm, moldado em formato de mola comprimida, com um diâmetro externo de 13 cm. A mola foi então aberta manualmente, de maneira que as espirais tivessem o espaçamento pretendido em cada caso. A Figura 3 mostra um exemplar finalizado de cada espaçamento.

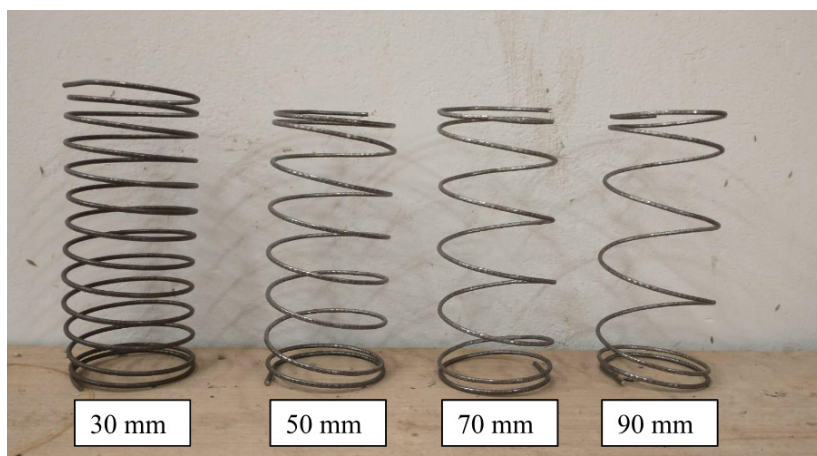


Figura 3 – Exemplares de espirais separadas por espaçamento
Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Como tensão de escoamento no aço foi adotado o valor de requisito da NBR 7480 (ABNT, 2022), de 600 MPa.

Métodos

A moldagem dos corpos de prova iniciou-se com a preparação do microconcreto autoadensável, o qual foi distribuído em uma camada de 2 cm no fundo dos moldes, e na sequência encaixou-se a madeira envolvida pelo aço no centro. Esse procedimento foi adotado para que os materiais não movessem a base do lugar pretendido durante a concretagem final. A Figura 4 mostra o conjunto de moldes com madeira e estribo helicoidal.



Figura 4 – Conjunto de CPs concretados na base de 2 cm

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Após um dia da fixação da base da madeira no molde, feita pela concretagem de aproximadamente 1,0 cm de altura, os corpos de prova (CPs) foram totalmente concretados. Adicionalmente aos CPs com madeira e estribos, também foram moldados seis CPs apenas com madeira e microconcreto, sem adição de aço, sujeitos aos mesmos ensaios que os demais. Para a cura, os CPs foram cobertos com um cobertor encharcado de água e com uma lona plástica para garantir a manutenção da umidade. A cura foi feita encharcando-se o cobertor a cada dois dias.

Decorridos 19 dias da desforma, os CPs foram retirados da cura e capeados. Foram então rompidos na prensa hidráulica, sendo que três exemplares de cada espaçamento do estribo foram submetidos à compressão simples. Os outros três exemplares foram submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade com equipamento específico para levantamento das deformações, como mostrado na Figura 5. Adicionalmente, também foram ensaiados na prensa seis exemplares de eucalipto sem concreto ou cintamento, para comparação com os resultados dos CPs cintados.



Figura 5 – CP com aparelhagem para deformação

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

A equação 1 foi adaptada, substituindo-se o núcleo de concreto, , por madeira e desconsiderando-se a presença das excentricidades. Tal proposta foi realizada de duas formas distintas: a primeira adotando-se um “híbrido teórico” entre madeira e o

concreto de cintamento; a segunda desconsiderando-se esse concreto, e considerando apenas a área da madeira.

Assim, tomando como base a primeira forma, tem-se a Equação 1 reescrita como:

$$f_{cu} = f_{méd} \left(1 + \alpha \frac{A_T}{A_{CI}} \times \frac{f_{yk}}{f_{méd}} \right) \quad (11)$$

Em que é a nova tensão híbrida entre concreto e madeira e é um coeficiente de multiplicação que depende do coeficiente de Poisson dos materiais envolvidos. Ambos podem ser calculados como uma média ponderada do valor de cada material na sua área de atuação, conforme apresentado nas equações 12 e 13.

$$f_{méd} = \frac{f_{c,m} \times A_c + f_{w,m} \times A_w}{A_c + A_w} \quad (12)$$

$$\mu_{méd} = \frac{\mu_c \times A_c + \mu_w \times A_w}{A_c + A_w} \quad (13)$$

Sendo $f_{méd}$ correspondente à tensão híbrida entre concreto e madeira; $f_{c,m}$ à resistência à compressão do concreto; A_c à área de concreto de cintamento; $f_{w,m}$ à resistência à compressão da madeira; A_w à área de madeira do núcleo. Os parâmetros $\mu_{méd}$, μ_c , μ_w referem-se ao coeficiente de Poisson híbrido, do concreto e da madeira, respectivamente.

A área de madeira foi calculada em relação à média dos diâmetros analisados (10 cm), e a área de concreto foi obtida pela subtração entre a área do núcleo contida pelo estribo e a área da madeira. A tensão do concreto foi obtida da caracterização do material, e para a da madeira foi utilizada a tensão dos ensaios de eucalipto roliço. Após a substituição dos dados na equação 12, obteve-se $f_{méd} = 39,92$ MPa.

Devido à ausência de experimentos para determinação do coeficiente de Poisson dos materiais envolvidos, os valores foram obtidos da literatura. Para o concreto, Süsskind (1987) avaliou que a maioria deles apresenta Poisson entre 0,15 e 0,25, sendo o último valor o recomendado pelo autor e adotado aqui neste estudo. Para a madeira, Ballarin e Nogueira (2003) obtiveram, experimentalmente, o valor de 0,23, e Pedroso (2014) encontrou o valor de 0,51, ambos para o eucalipto. Ao fazer a média entre esses dois estudos, obteve-se o valor de 0,37. Após a composição com o coeficiente do concreto, obteve-se o valor de $\mu_{méd} = 0,33$.

Reformulando-se a equação 11 para determinar a resistência à compressão do pilar cintado, considerando-se que apenas a madeira absorve as tensões de compressão, tem-se que: como o núcleo foi considerado todo de madeira, o coeficiente de Poisson adotado foi 0,37, o que alterou o coeficiente α da equação 11 para 1,35, e a tensão $f_{méd}$ foi substituída pela tensão observada experimentalmente na madeira, $f_{w,m} =$ MPa. Dessa forma, a nova equação pode ser escrita como:

$$f_{cu} = f_{w,m} \left(1 + \frac{1,35}{A_t} \right) A_{ci} \times \frac{f_{yk}}{f_{w,m}} \quad (14)$$

Para as avaliações sobre o módulo de elasticidade, foram adotadas as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2021).

A fim de obter melhor interpretação dos resultados experimentais de resistência à compressão e módulo de elasticidade, foi realizada Análise de Variância (ANOVA), usando o *software* SISVAR (2019). Na ANOVA, foi usado o teste de Tukey a um nível de confiabilidade de 95%.

Resultados e discussões

Os resultados quanto à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade são dados nos subitens 4.1 e 4.2, respectivamente.

Resistência à compressão

A análise dos resultados à compressão está dividida em análise da carga última, análise das tensões e análise da proposta analítica, conforme os subitens a seguir.

ANÁLISE DA CARGA ÚLTIMA

Realizou-se uma análise comparativa das cargas de ruptura para cada espaçamento. Os valores médios e os desvios padrões estão dispostos na Tabela 3 e plotados em gráficos comparativos na Figura 6.

Espaçamento (mm)	Carga última média (kN)	Desvio padrão (kN)
Eucalipto roliço	374,2	86,7
Sem estribo	327,0	94,3
90	401,0	56,0
70	434,0	81,8
50	423,5	64,6
30	511,5	59,1

Tabela 3 – Cargas últimas

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

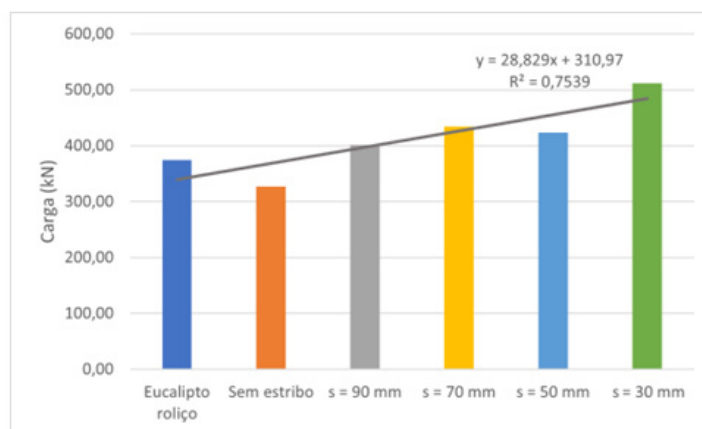


Figura 6 – Cargas últimas com linha de tendência

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Pode-se observar que, ao diminuir o espaço entre estribos, a carga de ruptura tendeu a aumentar, indicando o efeito do confinamento da madeira pelo concreto cintado. Quando se comparam os resultados de eucalipto roliço com os de 90 mm, percebe-se que, a partir da introdução de estribo de cintamento, mesmo com espaçamento mais alto, já há a tendência a promover um ganho na carga última. Também se vê uma tendência de relação linear entre o ganho de carga e espaçamento, com o R^2 da reta igual a 0,7539, segundo o qual 75,39% da variação dos resultados pode ser explicada pelo modelo matemático (Fernando, 2025).

A Figura 7 ilustra um corpo de prova (CP) sem estribo, antes do ensaio de resistência à compressão. Nele, vê-se a presença de uma fissura de retração por secagem ao longo de toda a altura do CP. Uma fissura semelhante foi também observada do lado oposto.

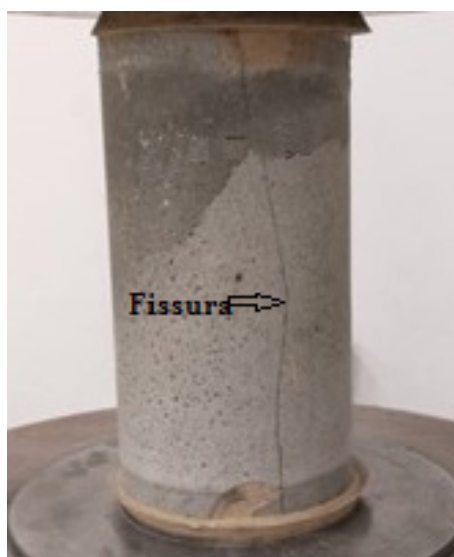


Figura 7 – Corpo de prova sem estribo
Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Assim, os resultados observados na Tabela 3 e na Figura 6 para os CPs sem estribos podem ser explicados pela presença das fissuras, que se constituíram em pontos de fragilidades que induziram à ruptura precoce do concreto, impossibilitando que ele cooperasse na absorção do carregamento.

Outro aspecto importante quanto aos valores das cargas de ruptura é que elas foram inferiores à carga resistente que seria obtida somando-se as parcelas de cada material (madeira e concreto), considerando-se madeira sem defeito e aderência perfeita entre a madeira e o concreto. Pela caracterização desses materiais, verificou-se: para a madeira, a resistência média de 53,58 MPa (Tabela 1); para o concreto, a resistência média de 28,69 MPa (Tabela 2). Considerando-se o diâmetro médio da madeira de 10 cm, e que o diâmetro final dos CPs foi de 15 cm, seriam obtidas as cargas resistentes de 421,0 kN e 282,0 kN para a madeira e o concreto, respectivamente, o que daria uma carga resistente total de, aproximadamente, 703,0 kN. Como não foi utilizado nenhum conector entre o eucalipto e o concreto – e desprezando-se a aderência química entre os dois materiais –, pode-se inferir que a aderência entre os dois materiais foi muito baixa, tornando a interface eucalipto-concreto uma região de fragilidade quanto à absorção de esforços.

Análise das tensões

De maneira análoga às cargas, calcularam-se as resistências à compressão dos CPs. De acordo com a hipótese apresentada na metodologia, a tensão foi calculada baseando-se na área de madeira. Os resultados estão dispostos na Tabela 4 e plotados em gráfico comparativo na Figura 8.

Espaçamento (mm)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Eucalipto roliço	44,86	5,49
Sem estribo	41,24	10,32
90	51,40	8,88
70	55,50	12,26
50	53,91	7,92
30	65,54	9,98

Tabela 4 – Tensão última de compressão de cada espaçamento

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

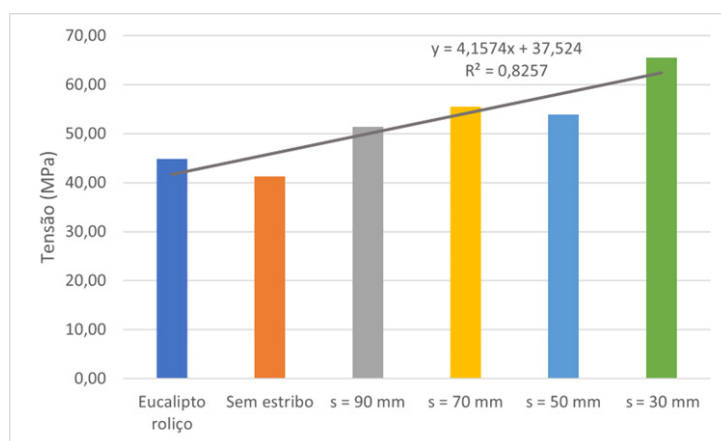


Figura 8 – Comparação das tensões médias

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Em todos os casos, o material composto apresentou uma tendência de ganho de resistência em relação ao eucalipto roliço, chegando a aumentar cerca de 46%, em média, para o caso de $s = 30$ mm. Aqui também se vê uma tendência de relação linear entre o ganho de resistência e espaçamento; neste caso, o R^2 da reta foi igual a 0,8257, indicando uma boa aproximação do modelo matemático.

A Tabela 5 apresenta os resultados da ANOVA para esta propriedade

Eucalipto	Sem estribo	s = 90mm	s = 70mm	s = 50mm	s = 30mm
a1	a1	a1, a2	a1, a2	a1, a2	a2

Tabela 5 – Resultado da análise estatística para resistência à compressão

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

A letra *a* está relacionada à propriedade; o número após a letra indica o nível da média. Assim, a1 e a2 indicam a resistência à compressão com dois níveis de média: 1 é o nível inferior, e 2 é o nível superior. Portanto, estatisticamente, o eucalipto roliço e

o sem estribo são iguais, e ambos diferentes do $s = 30$ mm, com valor superior. Já os $s = 90$ mm, $s = 70$ mm e $s = 50$ mm não diferem estatisticamente do eucalipto roliço nem do $s = 30$ mm, ao nível de confiabilidade de 95%. Assim, para este nível de confiabilidade, apenas o cintamento com $s = 30$ mm promoveu um ganho de resistência em relação ao eucalipto roliço.

Proposta analítica

Na Tabela 6, apresentam-se os resultados das tensões obtidas experimentalmente e as analíticas, calculadas considerando-se um “híbrido teórico” e apenas a área da madeira. Mostra-se também a diferença percentual entre os resultados experimentais e os analíticos, com sinal positivo se a tensão obtida experimentalmente for maior do que a analítica, e negativo se for menor.

Espaçamento (mm)	Experimental (MPa)	Analítica (híbrido teórico) (MPa)	Diferença (%)	Analítica (área da madeira) (MPa)	Diferença (%)
90	51,40	45,22	13,67	51,68	-0,54
70	55,50	46,74	18,75	53,64	3,48
50	53,91	49,47	8,98	57,15	-5,66
30	65,54	55,83	17,38	65,34	0,30

Tabela 6 – Comparação da tensão experimental com os resultados analíticos

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Como pode ser observado, considerando-se a área da madeira, obtiveram-se resultados mais próximos aos observados experimentalmente, denotando que essa equação foi a melhor aproximação para o comportamento dos corpos de prova.

Com isso, pode-se inferir que o concreto de cintamento contribuiu promovendo um ganho de resistência à madeira pelo impedimento de suas deformações transversais (efeito de confinamento); e que esta contribuição foi mais efetiva para o espaçamento dos estribos de 3 cm.

Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade apresentam-se na Tabela 7

Espaçamento (mm)	Módulo (GPa)	Desvio padrão (GPa)
90	43,73	5,11
70	41,09	10,44
50	43,99	4,75
30	46,27	1,34

Tabela 7 – Módulo de elasticidade à compressão de cada espaçamento

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Na Figura 9 apresentam-se os resultados dos módulos dos CPs cintados, o módulo da madeira e o módulo do concreto utilizado no cintamento.

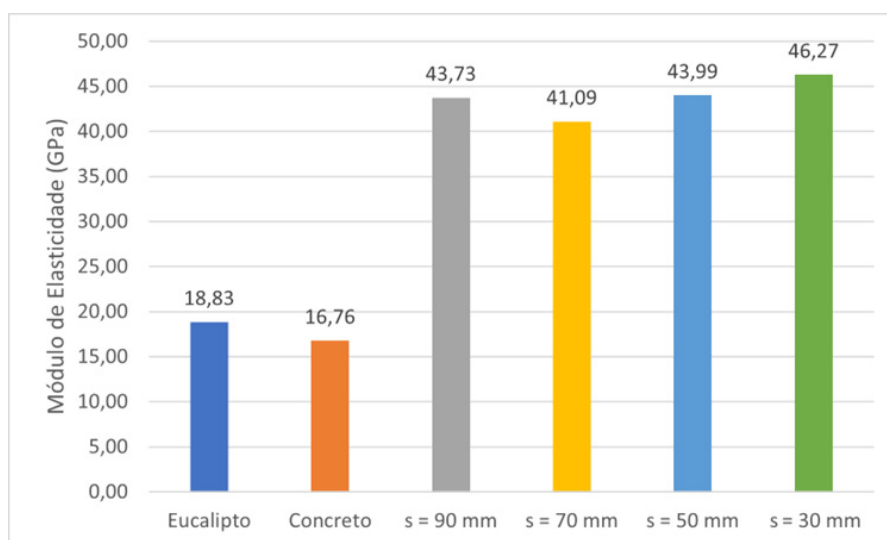


Figura 9 – Comparação das médias dos módulos dos CPs cintados com os materiais isolados

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

A Tabela 8 apresenta os resultados da ANOVA para esta propriedade, considerando-se os CPs cintados e o eucalipto.

Eucalipto	s = 90mm	s = 70mm	s = 50mm	s = 30mm
a1	a2	a2	a2	a2

Tabela 8 – Resultado da análise estatística para módulo de elasticidade

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2024).

Como pode ser visto, em todos os casos de espaçamento dos estribos, os valores observados foram superiores ao módulo do eucalipto, com aumentos de mais de 100%, superiores aos ganhos de resistência à compressão que, para os CPs com $s = 30$ mm, apresentaram um ganho de resistência de 46% em relação ao eucalipto, como visto no item anterior. Todavia, este aumento elevado quanto aos módulos de elasticidade está relacionado à ruptura precoce dos CPs com o cintamento, como discutido no item 4.1.1. Uma vez que a falta de aderência entre a madeira e o concreto tornou essa interface fragilizada, com pouca resistência, e por onde se antecipou o processo de ruptura do material composto – posto que o módulo de elasticidade foi determinado para 30% da carga de ruptura, conforme NBR 8522 (ABNT, 2021) –, este percentual ficou aquém do valor que seria obtido, caso não houvesse a ruptura precoce. Logo, as deformações geradas foram inferiores, resultando em módulos de elasticidade mais elevados.

Considerações Finais

O presente estudo avaliou o comportamento de pilares curtos de madeira cintados com microconcreto armado. As principais conclusões obtidas foram:

- O ganho máximo de resistência à compressão dos pilares cintados foi de 46% em relação à resistência do pilar de referência, sem cintamento.

- A rigidez dos pilares cintados, avaliada por meio do módulo de elasticidade, foi superior à rigidez do pilar de referência. Todavia, os valores obtidos não refletiram o real aumento de rigidez, pela ocorrência da ruptura precoce dos pilares, função da fragilidade da interface entre a madeira e o concreto.
- Dentre os espaçamentos dos estribos, 30, 50, 70 e 90 mm, o melhor resultado foi de 30 mm para a resistência à compressão; quanto ao módulo de elasticidade, a variação do espaçamento não alterou significativamente os resultados.
- A formulação analítica para a estimativa da resistência à compressão, baseada na hipótese de que apenas a seção de madeira absorveu os esforços, apresentou excelentes resultados comparados aos resultados experimentais, com a maior diferença inferior a 6%.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5738*: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5739*: 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: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7190-3*: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7480*: aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 8522*: concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 9778*: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ANTONANGELO, A.; BACHA, C. J. C. As fases da silvicultura no Brasil. *Revista Brasileira de Educação – RBE*, Rio de Janeiro, v. 52, n. 1, p. 207-238, 1998.

BACHA, C. J. C. *A dinâmica do desmatamento e do reflorestamento no Brasil*. 1993. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da madeira de *Eucalyptus citriodora*. *Cerne*, Lavras, v. 9, n. 1, p. 66-80, 2003.

BASTOS, P. S. *Fundamentos do concreto armado*. Bauru: Unesp, 2019.

BENTES-GAMA, M. de M. Eucalipto: técnicas de plantio alteram resultados. *Revista da Madeira*, Curitiba, n. 97, jun. 2006. Disponível em: https://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=923&subject=Eucalipto&title=T%E9cnicas%20de%20plantio%20alteram%20resultados. Acesso em: 18 out. 2025.

FERNANDES, I. Eucalipto: por que se tornou a árvore mais plantada no Brasil? *AgroPós*, 2020. Disponível em: <https://agropos.com.br/eucalipto-no-brasil/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

CALIL JR., C.; BRITO, L. D. Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento. *Cadernos de Engenharia de Estrutura*, São Carlos, v. 12, n. 56, p. 57-77, 2010.

CECCOTTI, A. Composite concrete-timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, Veneza, v. 4, p. 264-275, 2002.

DIAS, Alfredo M. P. G. Sistemas mistos madeira-betão: aplicação e dimensionamento. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Lisboa, n. 7, p. 81-86, 2018.

FERNANDO, J. R-Squared: definition, calculation, and interpretation. Investopedia, [2025]. Disponível em: <https://www.investopedia.com/terms/r/r-squared.asp>. Acesso em: 18 out. 2025.

FRANCISCHINELLI, A. Postes de eucalipto tratado. *Revista da Madeira*, Curitiba, n. 97, 2006. Disponível em: https://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=918&subject=E. Acesso em: 18 out. 2025.

FUSCO, P. B. *Estruturas de concreto: solicitações normais*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). *Relatório anual IBÁ 2022*. São Paulo: IBÁ, 2022.

KHAIYUM, M. Z.; SARKER, S.; KABIR, G. Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context. *Sustainability*, [s. l.], v. 15, n. 21, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152115407>.

LEVY, E. 15 different eucalyptus tree types (and classifications). *PlantSnap*, 2020. Disponível em: <https://www.plantsnap.com/blog/eucalyptus-tree-types/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

MACHADO, M.; BACARJI, E.; CARASEK, E. Microconcreto autoadensável em reforços estruturais: aplicação como ponte de aderência. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0007>.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

PEDROSO, C. B. *Propriedades de resistência e de rigidez da madeira obtidas a partir da avaliação acústica na árvore*. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

PEREIRA, M. F. *Comportamento estrutural de pilares mistos parcialmente revestidos submetidos a flexo-compressão*. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

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

REVISTA DA MADEIRA. Curitiba: Porthus Comunicação, v. 59, set. 2001.
Disponível em: https://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_capa.php?edicao=59&button2=OK. Acesso em: 18 out. 2025.

SCIENCE MUSEUM. Building the modern world: concrete and our environment. *Science Museum*, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.sciencemuseum.org.uk/objects-and-stories/everyday-wonders/building-modern-world-concrete-and-our-environment>. Acesso em: 8 jul. 2022.

SILVA, A. C. *et al.* Microconcreto de alto desempenho: propriedades e comportamento de pilar à flexão normal composta. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0495>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/kfQbWmyK44LgYc7w4RwVnmy/?lang=pt>. Acesso em: 8 jul. 2025.

SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics*, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019. ISSN 1983-0823. DOI: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>. Disponível em: <http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450>. Acesso em: 18 out. 2025.

SÜSSEKIND, J. C. *Curso de concreto*. 3. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987. v. 2.

TAKEUTI, A. R. *Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho*. 1999. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

VIVIAN, M. A. *et al.* Qualidade do tratamento preservativo em autoclave para a madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 445-453, 2012.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. *Reinforced concrete: mechanics & design*. 6. ed. New Jersey: Pearson, 2011.