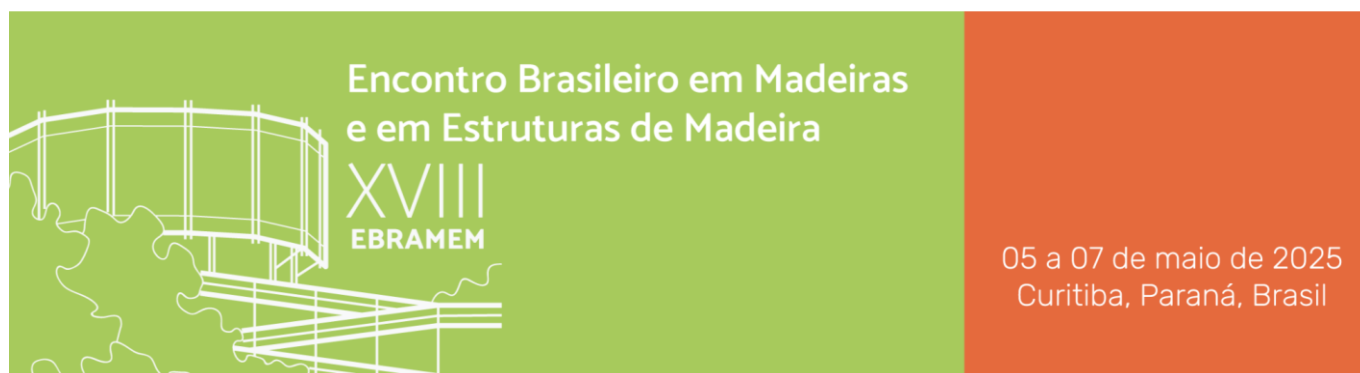




SISTEMA MISTO MADEIRA-CONCRETO: ANÁLISE DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO CENTRADA

Suzane Cavalcante Marques^{1*}, Edgar Bacarji¹ e Matheus Peres Chagas¹

*Autor de contato: suzanecavalcante@discente.ufg.br

¹ Grupo ou Departamento, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil

RESUMO

Os sistemas estruturais mistos madeira-concreto são tema relevante entre as pesquisas teórico-experimentais, dado que o arranjo entre as propriedades mecânicas da madeira (elevada resistência à tração e compressão) e do concreto (alta resistência à compressão) formam estruturas rígidas e eficientes. Neste contexto, a presente pesquisa avaliou o comportamento mecânico de um sistema misto eucalipto-microconcreto, com a variação do espaçamento entre os conectores. Para isso, tomaram-se peças de madeira roliça, nas quais fixaram-se os parafusos. Avaliaram-se os corpos de prova sem parafusos, e fez-se variar o espaçamento dos parafusos em 12,5, 6,25 e 3,125 cm. Para cada espaçamento, foram moldados 6 corpos de prova, os quais foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Analisados os resultados, observou-se que o melhor espaçamento entre os parafusos foi o de 6,25 cm. O sistema misto apresentou carga última superior à dos materiais isolados. Todavia, suas tensões últimas foram inferiores. Quanto ao módulo de elasticidade, o sistema com espaçamento de 6,25 cm apresentou valor superior ao do eucalipto e inferior ao do microconcreto. A interface eucalipto-microconcreto, com os parafusos como conectores, se mostrou uma região de fragilidade.

Palavras-chave: sistemas mistos; madeira; microconcreto; resistência.

ABSTRACT

The mixed structural systems are a relevant theme among theoretical-experimental research, given that the arrangement between the mechanical properties of wood (high tensile and compressive strength) and concrete (high compressive strength) form rigid and efficient structures. In this regard, the present research analyzed the mechanical behavior of a mixed eucalyptus-microconcrete system, with the spacing variation between the connectors. To do so, round pieces of eucalyptus were used, and screws were fixed. The specimens were evaluated without screws, and the screw spacing was varied at 12.5, 6.25 and 3.125 cm. For each spacing, 6 test specimens were molded, and subjected to compressive strength and modulus of elasticity tests. After analyzing the results, it was observed that the best spacing between the screws was 6.25 cm. The mixed system presented a higher ultimate load than the isolated materials. However, their ultimate tensile strength was lower. As for the modulus of elasticity, the system with a spacing of 6.25 cm presented a higher value than that of eucalyptus and lower than that of microconcrete. The eucalyptus-microconcrete interface, with screws serving as connectors, proved to be a fragile region.

Keywords: mixed systems; wood; microconcrete; resistance

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil se apresenta como uma das áreas responsáveis pelos impactos ambientais, que permeiam todo o processo construtivo, materializando-se na extração e fabricação de materiais, execuções de obras e na geração de resíduos (Roth; Garcia, 2009). Sob essa perspectiva, inúmeras pesquisas teóricas-experimentais têm-se preocupado com o estudo de soluções construtivas que tenham como objetivo a sustentabilidade, na qual as espécies de madeira colocam-se como principais materiais na elaboração de elementos estruturais, dadas as suas elevadas propriedades mecânicas, sustentabilidade e economia. A associação deste material com o concreto, que corrobora para um sistema estrutural misto madeira-concreto, tem-se expressado como uma alternativa técnica e ecologicamente viável para a construção e recuperação de elementos estruturais (Jorge, 2005).

Os sistemas estruturais mistos madeira-concreto consistem na união e agrupamento das características mecânicas e físicas de uma espécie de madeira e um certo tipo de concreto, apresentando resultados expressivos no aumento da resistência aos esforços de tração e compressão. Esses sistemas podem ser aplicados na construção de inúmeras estruturas e elementos (pontes, estradas, pisos, vigas, pilares, plataformas e afins) e se fazem presentes em vários países da Europa e América do Norte.

A crescente adesão na utilização dos sistemas estruturais mistos é resultado da combinação de propriedades assertivas dos materiais agrupados no que se refere a resistência mecânica, sustentabilidade e redução de custos, que corroboram para ganhos expressivos na capacidade de carga, eficiência contra à ação do fogo, leveza do elemento, processo de fabricação rápido e simplificado, propriedade térmicas e acústicas (Nicolas, 2001).

O concreto consiste em um dos materiais mais utilizados na indústria da construção civil, em razão de sua resistência à ação da água, resistência aos esforços à compressão, elevada trabalhabilidade, e alta disponibilidade a um custo baixo (Metha; Monteiro, 2008). Este material configura-se como um elemento heterogêneo composto por uma mistura formada por aglomerantes, água, ar, agregados miúdos e graúdos, com ou sem a presença de aditivos. A resistência e durabilidade de um concreto são diretamente influenciadas pelas propriedades físicas e mecânicas dos materiais escolhidos para sua formação, bem como, estão condicionadas à proporção adotada para os elementos que o constitui e sua correta execução e aplicação (Couto et al, 2013). Contudo, os desafios do mercado e das técnicas construtivas corroboram para um amplo arranjo de configurações de concreto, nas quais características especiais são atribuídas a este material conforme a sua necessidade e uso. Assim, diversos são os tipos de concreto produzidos (alto desempenho, autoadensável, pesado, compactado com rolo, leve etc.), podendo ainda combiná-los (autoadensável de alto desempenho, autoadensável leve, e outros). A madeira, por sua vez, consiste em um material natural e renovável e apresenta-se como um elemento relativamente leve, com grande trabalhabilidade, baixo custo em implementação e com boas propriedades físicas e mecânicas (isolamento térmico e elevada resistência à compressão). Em razão da extensa variedade de espécies florestais, este material poderá apresentar propriedades físicas e mecânicas significativamente diferentes conforme a madeira utilizada (Farias, 2020).

Isto posto, nota-se a potencialidade dos sistemas estruturais mistos madeira-concreto, uma vez que se aproveita as melhores propriedades físicas e mecânicas dos materiais, convergindo para

a produção de elementos estruturais sustentáveis, resistentes, econômica e tecnicamente viáveis. Assim, o presente estudo explorou a viabilidade técnica do uso do sistema misto madeira de plantio e microconcreto.

1.1 Objetivos

O presente estudo tem como principal objetivo analisar a viabilidade técnica de um sistema misto madeira-microconcreto, através da análise experimental de corpos de provas submetidos à compressão centrada.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são, relativos aos sistemas mistos:

- Avaliar a sua capacidade de carga, resistência à compressão e módulo de elasticidade;
- Avaliar o comportamento do sistema fazendo-se variar o espaçamento entre os parafusos.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

Neste tópico são apresentados os materiais utilizados para a realização do presente estudo, bem como, serão detalhados os procedimentos necessários para as suas preparações, e os ensaios de caracterização executados, fundamentais para a identificação física e comportamental dos materiais.

2.1.1 Madeira de plantio

A madeira de plantio, utilizada na confecção dos corpos de prova mistos e de madeira, é da espécie *Eucalyptus grandis*, proveniente de uma indústria madeireira de Goiânia, no estado de Goiás. Para a realização dos procedimentos experimentais, utilizaram-se peças roliças, as quais foram previamente descascadas, tratadas, cortadas conforme as dimensões solicitadas por cada ensaio, e posteriormente, identificadas (Figura 1).

Para este material realizaram-se os ensaios de densidade básica, 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). Os resultados encontrados estão dispostos no Quadro 1.

Quadro 1 – Caracterização da madeira de plantio

Propriedade	Valor médio
Umidade natural (%)	52,66
Densidade básica (kg/m ³)	628,58
Carga de ruptura média (kgf)	11.067
Resistência à compressão (MPa)	38,16
Módulo de Elasticidade (GPa)	12,33

Fonte: os autores.

Figura 1 – Peças roliças de eucalipto com altura de 29 cm.



Fonte: os autores.

2.1.2 Microconcreto

O microconcreto, utilizado para a confecção dos corpos de prova mistos (madeira-concreto), foi preparado com cimento CP-V ARI, sílica ativa e cinza volante como aglomerante (80%, 10% e 10%, respectivamente), areia de rio e de basalto, no traço 1:0,5:1,5 em massa, com uma relação água/aglomerante de 0,37. Utilizou-se ainda, em sua preparação, aditivo superplastificante no teor de 1,0%, a fim de proporcionar uma melhoria na trabalhabilidade do material no momento de moldagem dos corpos de prova. Para a caracterização do material, avaliou-se ainda o espalhamento do microconcreto (Figura 2).

Em posse do traço utilizado na confecção microconcreto, realizou-se a caracterização das propriedades físicas e mecânicas deste material, por meio dos ensaios de espalhamento, realizado ainda em estado fresco, massa específica (ABNT NBR 9778/2005), resistência à compressão (ABNT NBR 5739/2018) e módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522/2021). Os resultados de caracterização do concreto encontram-se dispostos no Quadro 2.

Figura 2 - Avaliação do espalhamento do microconcreto



Fonte: os autores.

Quadro 2 – Caracterização do microconcreto

Propriedade	Valor médio
Espalhamento (mm)	612,50
Massa específica (kg/m³)	2.228,20
Resistência à compressão (MPa)	33,92
Módulo de Elasticidade (GPa)	28,85

Fonte: os autores.

2.1.3 Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante TECFLOW 7000, utilizado na preparação do microconcreto, consistiu em um aditivo à base de policarboxilatos.

2.1.4 Conectores

O sistema de conectores utilizados na confecção dos corpos de prova mistos consistiu em parafusos bicromatizados de aço de baixo carbono, de cabeça chata para Phillipis, da marca CISER, cujas dimensões nominais foram iguais à 4,0 X 45 mm (Figura 3). Estes parafusos foram dispostos em três configurações de espaçamentos.

Figura 3 – Parafuso bicromatizado de cabeça chata para Phillipis



Fonte: os autores.

2.2 Métodos

Adotaram-se quatro configurações de corpos de provas mistos, nos quais variaram-se os espaçamentos entre os parafusos, distribuindo-os em quatro linhas diametralmente opostas duas a duas (Figura 4). Utilizou-se ainda como referência um sistema sem a presença dos parafusos. A disposição dos parafusos, bem como a quantidade de material utilizado para cada configuração apresenta-se no Quadro 3.

A primeira configuração de corpos de prova consistiu na associação entre a peça de eucalipto e o microconcreto, sem a presença do parafuso. Para a segunda configuração de corpos de prova, agrupou-se o eucalipto ao microconcreto, através da incorporação de um sistema de ligação com espaçamento de 12,5 centímetros entre cada parafuso (Figura 5).

Figura 4 – Disposição dos parafusos nos corpos de provas mistos (Vista em planta)



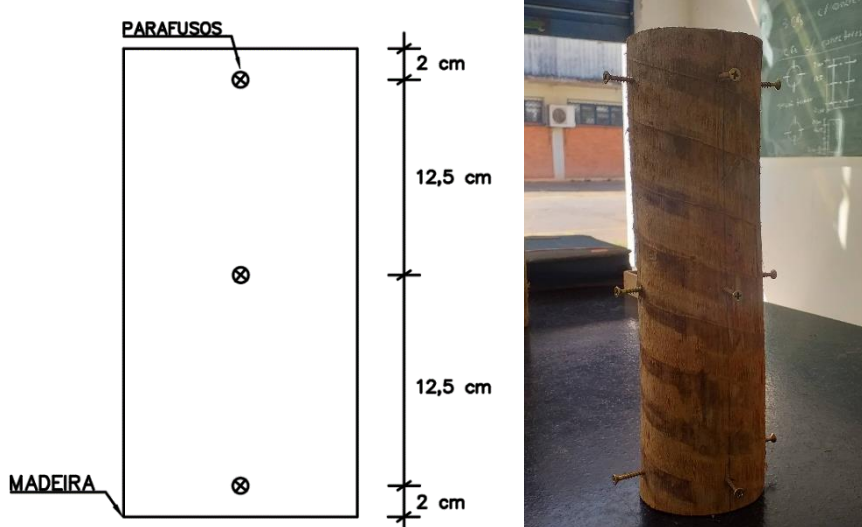
Fonte: os autores.

Quadro 3 – Configurações dos corpos de provas mistos

Configurações	Quantidade de parafusos	Espaçamento dos parafusos no corpo de prova (cm)		
		Inicial	Intermediário	Final
Sem parafuso	0	-	-	-
12,5 cm	16	2	12,5	2
6,25 cm	24	2	6,25	2
3,125 cm	40	2	3,125	2

Fonte: os autores.

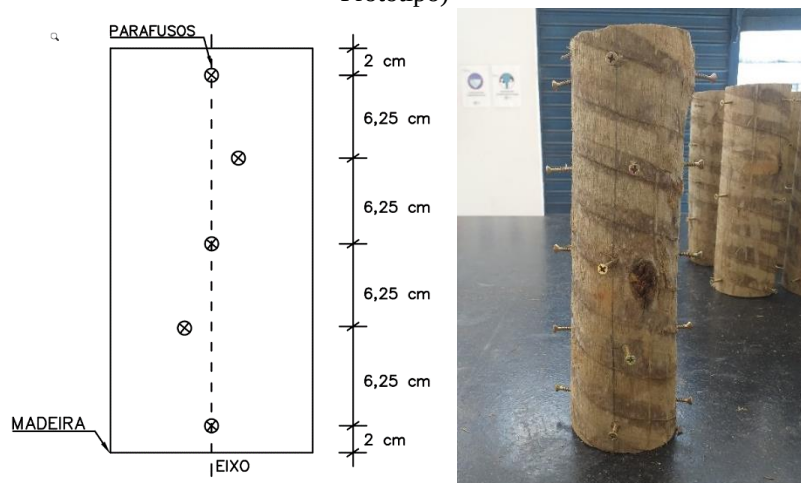
Figura 5 – Corpos de provas mistos com espaçamento de 12,5 cm entre os parafusos (Esquemática e Protótipo)



Fonte: os autores.

A terceira configuração de corpos de prova, por sua vez, consistiu no espaçamento de 6,25 centímetros entre cada parafuso (Figura 6).

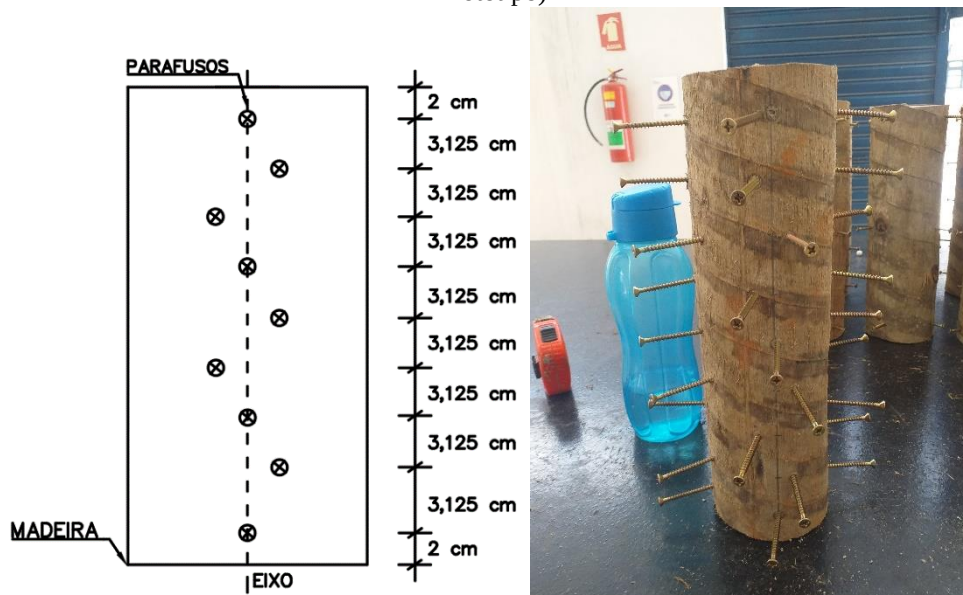
Figura 6 – Corpos de provas mistos com espaçamento de 6,25 cm entre os parafusos (Esquemática e Protótipo)



Fonte: os autores.

Por fim, para a quarta configuração de corpos de prova, reduziu-se o espaçamento entre os conectores, distanciando os parafusos a 3,125 centímetros um do outro (Figura 7).

Figura 7 – Corpos de provas mistos com espaçamento de 3,125 cm entre os parafusos (Esquemática e Protótipo)



Fonte: os autores.

A moldagem dos corpos de prova iniciou-se com a preparação do microconcreto. Posteriormente, em um molde cilíndrico, com dimensões 15 x 30 cm, adicionou-se uma pequena camada de microconcreto com espessura de 1,5 cm na parte inferior dos recipientes para a fixação dos corpos de madeira no centro do recipiente, com o propósito de restringir o deslocamento da peça de madeira durante a concretagem. No dia seguinte, os corpos de prova foram totalmente concretados. Prontamente, os recipientes foram identificados com o número do corpo de prova, para facilitar a análise dos efeitos dos espaçamentos dos conectores fixados na madeira.

Decorridas 24 horas após a concretagem final, os corpos de prova foram desformados e envoltos por um cobertor umedecido e por uma lona plástica, tendo assim permanecidos até um dia antes da realização dos ensaios. Findado o processo de cura, após quatorze dias, os corpos de prova foram capeados e submetidos aos ensaios de Resistência à compressão e de Módulo de elasticidade, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522-1 (ABNT, 2021), respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise visual dos corpos de prova antes da ruptura

Os corpos de prova, quando retirados de seus moldes, apresentaram algumas fissuras que se estenderam ao longo de todo o comprimento dos corpos de prova, conforme pode-se observar na Figura 8.

Figura 8 – Corpos de prova mistos após a desforma



Fonte: os autores.

Estas fissuras ocorreram por uma associação de efeitos. O primeiro foi a retração por secagem do concreto (Milagres, 2019); o segundo pelo inchamento da madeira, pela absorção da água do ambiente, presente para a cura do concreto (Balloni, 2009); o terceiro efeito foi a retração autógena, inerente ao concreto.

3.2. Análise visual dos corpos de prova após a ruptura

Após a realização dos ensaios de resistência à compressão, observou-se que os corpos de provas sem parafusos apresentaram deslocamento precoce da camada de microconcreto (Figura 9a). Em razão da ausência dos parafusos, a aderência do concreto com a madeira foi devida apenas à aderência química entre os dois materiais, que é muito baixa, provocando assim, os deslocamentos observados. Os corpos de prova com parafusos no espaçamento de 12,5 cm (Figura 9b), por sua vez, apresentaram o deslocamento do microconcreto entre os parafusos que compuseram o sistema. Este deslocamento ocorreu nas partes delineadas pelas fissuras observadas antes da execução dos ensaios.

Por sua vez, os corpos de prova com espaçamento 6,25 entre os parafusos (Figura 10a) não apresentaram deslocamento do microconcreto, porém as rupturas também foram delineadas pelos alinhamentos dos parafusos. Nos corpos de provas com espaçamento de 3,125 cm entre os parafusos, não se observaram, visualmente, deslocamentos e nem delineamento da ruptura (Figura 10b).

Figura 9 – Visualização pós ruptura dos corpos de prova sem parafusos (a) e no espaçamento de 12,5 cm (b).



Fonte: os autores.

Figura 10 – Comparação da ruptura dos corpos de prova nos espaçamentos de 12,5 e 3,125 cm, respectivamente



Fonte: os autores.

3.2 Resistência à compressão

Os valores coletados para as cargas médias de rupturas dos corpos de prova, obtidos pelo ensaio neste ensaio são dadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise comparativa da carga de ruptura para cada configuração de espaçamento

Configurações	Carga de ruptura média (kgf)
Sem parafuso	40.400
12,5 cm	39.650
6,25 cm	41.200
3,125 cm	43.267

Fonte: os autores.

De posse das cargas de ruptura, obtiveram-se as tensões médias dadas na Tabela 2.

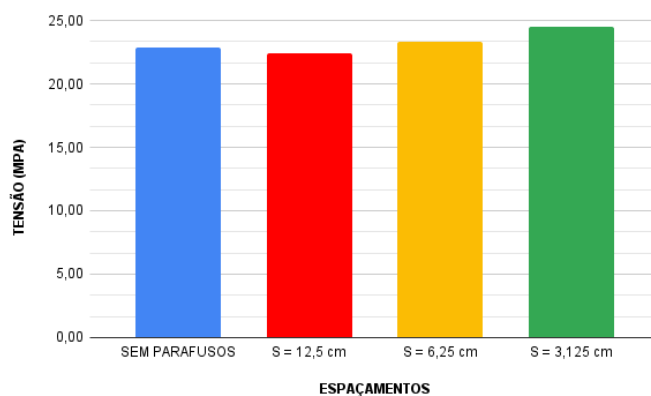
Tabela 2 – Análise comparativa da tensão de compressão simples para cada configuração de espaçamento

Configurações	Tensão (MPa)
Sem parafuso	22,86
12,5 cm	22,44
6,25 cm	23,31
3,125 cm	24,48

Fonte: os autores.

Estes resultados estão apresentados em forma de gráfico de barras na Figura 11.

Figura 11 – Resistência à compressão para cada configuração de espaçamento



Fonte: os autores.

Como se observa, os resultados para o espaçamento de 12,5 cm ficaram muito próximos dos resultados para os CPs sem parafusos, não apresentando nenhum ganho de resistência. No entanto, à medida que se reduziu o espaçamento, houve um ganho de tensão, indicando a melhora no comportamento. Tal melhora se deveu ao ganho de aderência entre o eucalipto e o microconcreto o que, por sua vez, retardou o deslocamento entre os dois materiais.

3.3 Módulo de Elasticidade

Os resultados médios obtidos para o ensaio de módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 3.

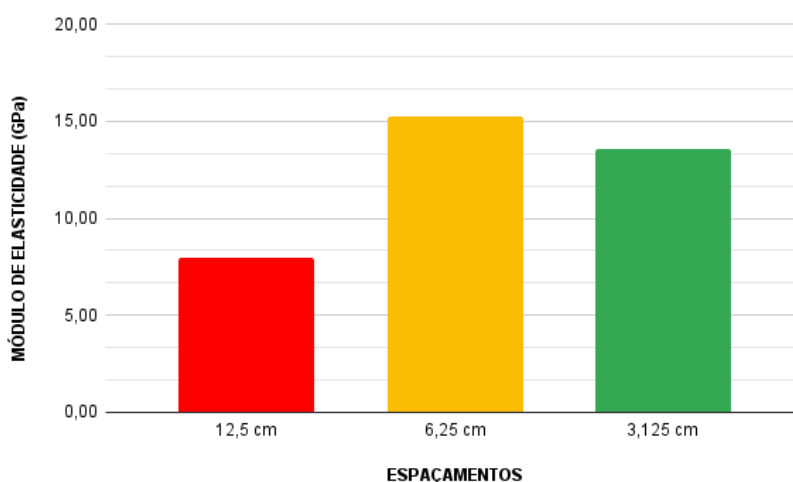
Tabela 3 – Análise comparativa do módulo de elasticidade para cada configuração de espaçamento

Configurações	Módulo de Elasticidade (GPa)
12,5 cm	7,97
6,25 cm	15,25
3,125 cm	13,59

Fonte: os autores.

Estes mesmos resultados são dados em forma de gráfico de barras na Figura 12.

Figura 12 – Comparação das tensões de compressão para cada configuração de espaçamento



Fonte: os autores.

Pela análise destes resultados percebe-se que, quanto ao módulo de elasticidade, ao se reduzir o espaçamento entre os parafusos, houve um aumento considerável no valor desta variável, ou seja, um ganho de rigidez do sistema misto. A pequena redução para o espaçamento de 3,125 cm em relação ao espaçamento de 6,25 cm pode estar relacionada à grande variabilidade nas propriedades da madeira (Pfeil, 2003). Os corpos-de-prova sem os conectores não foram ensaiados em virtude do risco de se danificar o compressômetro pelo deslocamento precoce do concreto.

3.4 Análise comparativa entre os resultados de caracterização do eucalipto e do microconcreto

3.4.1 Resistência à Compressão

Comparando-se os resultados de caracterização do eucalipto e do microconcreto, Quadro 1 e Quadro 2, com os resultados dados na Tabela 2, vê-se que as resistências à compressão do sistema misto eucalipto-microconcreto foram inferiores aos valores isolados destes dois materiais. Tal resultado, advém do fato de que, no sistema misto, criou-se uma zona frágil entre a madeira e o microconcreto, por onde, provavelmente, iniciou-se o processo precoce de ruptura

por deslocamento. Assim, a introdução dos parafusos não foi suficiente para enrijecer esta interface na situação de ruptura.

3.4.2 Módulo de Elasticidade

Ao se observar os resultados de Módulo de elasticidade, Quadro 1 e Quadro 2 com os resultados do sistema eucalipto-microconcreto, dados na Tabela 3, verifica-se um comportamento diferenciado em relação à resistência à compressão, ou seja, o melhor resultado, para o espaçamento de 6,25 cm, foi de 15,25 GPa, maior que o módulo de elasticidade do eucalipto, de 12,33 GPa; portanto, um aumento de quase 24%. Ao se comparar com o módulo do microconcreto, todavia, o sistema misto se mostrou menos rígido.

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas foram:

- O melhor espaçamento entre os parafusos foi o de 6,25 cm;
- Para o espaçamento de 6,25 cm, o sistema misto obteve um módulo de elasticidade quase 24% superior ao módulo de elasticidade do eucalipto; todavia, inferior ao módulo do microconcreto;
- A interface eucalipto-microconcreto com os parafusos como conectores, se mostrou uma região de fragilidade, por onde se iniciou a ruptura por deslocamento do concreto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 **Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro. 2021.

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

BALLONI, C.J.V. **Caracterização física e química da madeira de Pinus Elliotti**. Trabalho de Graduação. Engenharia Industrial Madeireira - UNESP. Itapeva, 2009.

COUTO, J.A.S.; CARMINATTI, R.L.; NUNES, R.R.A.; MOURA, R.C.A. **O Concreto como material de construção**. Cadernos de Graduação. Sergipe, V. 1, N. 17, p. 49 - 58, out, 2013. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/552>. Acesso em: 05 ago. 2024.

FARIAS, D. T.; MELO, R. R. **Caracterização macroscópica da madeira de cinco espécies da Caatinga**. Research, Society and Development, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 8, p. 1-

14, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/5614> . Acesso em: 04 ago. 2024.

JORGE, L.F.C. **Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de agregados leves**. Tese (Doutorado) - Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. 2005. Disponível em: <https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/126/1/Estruturas%20Mistas%20Madeira-Bet%C3%A3o%20com%20utilizacao%20de%20beto%C3%AAs%20de%20agregados%20leves.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª Edição. São Paulo: Ibracon, 2008.

MILAGRES, E. **Retração e Secagem do Concreto: Estudo da retração do Concreto e o Aparecimento de Patologias**. Monografia (Especialização) - Produção e Gestão do Ambiente Construído, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/34122/3/monografia%20FINAL%2028%2002%202020.pdf> .Acesso em: 01 ago. 2024.

NICOLAS, E. A. **Estudo de ligações em estruturas mistas de concreto-madeira**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 2001. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/219077> . Acesso em: 05 ago. 2024.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6a Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

ROTH, C.G.; GARCIA, C.M. **Construção Civil e a Degradação Ambiental**. Desenvolvimento em Questão, n.13, p. 111-128, jun, 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/752/75212355006.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2024.