

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

**ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE LVL DE PARICÁ (*SCHIZOLOBIUM
AMAZONICUM*) REFORÇADOS COM BARRAS DE AÇO ROSQUEADAS
COLADAS COM EPÓXI**

**VINÍCIUS DE SOUSA LIMA¹, SANDRIEL LIMA NASCIMENTO¹, MARIA
GABRIELA SALES DA SILVA¹, MARCO ANTONIO SIVEIRO², JÉSSICA
ALMEIDA DOS SANTOS¹, JOÃO MIGUEL SANTOS DIAS¹**

AFILIAÇÃO

¹ UEMASUL - CCHSTL/Eng. Civil - Rua Topázio, 100. Vila São Francisco. CEP: 65930-000. Açailândia-MA.

² Grupo Arboris – Rua Gonçalves Dias, 919. CEP: 68633-000. Dom Eliseu-PA.

RESUMO

A combinação de barras coladas e produtos de madeira engenheirada promove a produção de elementos estruturais com alta relevância para a construção moderna. Neste estudo, foi investigado o comportamento mecânico de elementos estruturais de LVL de paricá reforçados com barras rosqueadas de aço coladas com epóxi. Para a campanha experimental, foram usados elementos de LVL, barras de aço rosqueadas de 6,35 mm de diâmetro e adesivo epóxi bicomponente de alta fluidez. Como primeira etapa, foi analisado o impacto do comprimento de ancoragem das barras na força de arrancamento máxima, em corpos de prova submetidos à tração. Para isso, foram adotados comprimentos de ancoragem equivalentes a 10, 12,5 e 15 vezes o diâmetro das barras de aço rosqueadas. Em seguida, de posse dos resultados obtidos dos ensaios de tração, foi definido o comprimento necessário das barras de aço rosqueadas para o reforço em corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão estática em quatro pontos. Após análise dos resultados verificou-se que: o comprimento de ancoragem de 15 vezes o diâmetro da barra apresentou os maiores resultados de capacidade de carga e o maior número de espécimes com ruptura na barra de aço; o reforço das vigas com barras rosqueadas de aço coladas contribuiu positiva e significativamente na capacidade de carga e rigidez à flexão dos espécimes; o reforço com barras de aço coladas nas regiões de tração e compressão apresentou os maiores valores de resistência e rigidez mecânica à flexão; a utilização de barras de aço de reforço, em relação ao LVL não reforçado, produziu um comportamento mecânico mais uniforme e dúctil na estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Barras coladas; Madeira; Produtos engenheirados.

INTRODUÇÃO

Um tipo de ligação promissora em estruturas de madeira, amplamente estudada nas últimas décadas devido ao seu alto desempenho mecânico, é a barra colada, conhecida em inglês

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

como *glued-in rod* (GiR) (Ratsch *et al.*, 2019). A ligação GiR consiste em uma ou mais barras coladas, por meio de adesivos estruturais, em madeira maciça ou em produtos engenheirados de madeira. De acordo com Dias *et al.* (2021) essa conexão apresenta vantagens como: facilidade e baixo custo de execução; alta rigidez; eficiência na transferência de carga; boa resistência ao fogo e aparência estética.

Além do seu uso para conectar elementos estruturais, as barras de aço rosqueadas também podem ser utilizadas em reforços de vigas de madeira. As estruturas reforçadas com barras de aço são promissoras para a construção contemporânea, pois não requerem equipamentos complexos e são fáceis de fabricar (Lukin *et al.*, 2021).

A combinação de barras coladas e produtos de madeira engenheirada promove a produção de elementos estruturais com alta relevância para a construção moderna. Dentre os produtos engenheirados de madeira, podemos destacar o LVL (*laminated veneer lumber*). Esse produto é composto por lâminas de até 6,4 mm de espessura, coladas por meio de adesivo estrutural, com suas fibras posicionadas na mesma direção.

De acordo com Lima *et al.* (2023), o paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke) Barneby) é uma espécie de madeira promissora para a fabricação painéis laminados como o LVL, por possuir características apropriadas para as indústrias de laminação, tais como a baixa densidade, fácil trabalhabilidade, poucos defeitos naturais de crescimento e alta porosidade.

A falta de procedimentos de projeto padronizados e critérios normativos de dimensionamento é um dos principais fatores que interferem na disseminação do uso das técnicas de barras coladas na construção civil (Jockwer; Serrano, 2021). Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento mecânico de elementos estruturais de LVL de paricá reforçados com barras de aço coladas com epóxi.

METODOLOGIA

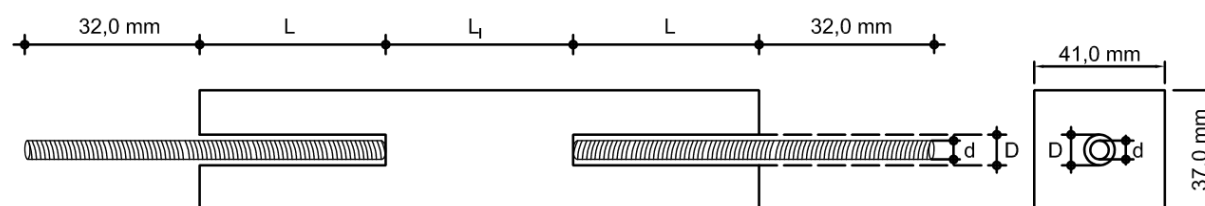
Para os experimentos, foram usados LVLs compostos por 17 lâminas, sendo 14 da espécie de paricá e 3 da espécie de marupá (*Simarouba amara* Aubl.). A colagem das lâminas foi realizada com o adesivo à base de ureia formaldeído, com temperatura de 112 °C e pressão de 1,77 MPa. A caracterização física e mecânica desses LVLs pode ser encontradas em Lima *et al.* (2023). Além disso, foi usado o adesivo epóxi *Compound* bicomponente de alta fluidez, do fabricante *Vedacit*, para a colagem das barras no LVL, e barras de aço rosqueadas de 6,35

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

mm de diâmetro.

Os corpos de prova (CPs) dos ensaios de *Glued-in rods* (GiR) apresentaram seção transversal de $41,0 \times 37,0$ (mm²) e comprimento longitudinal de 46,2 cm. O comprimento de ancoragem L , conforme apresentado na Figura 1, foi escolhido como a variável de estudo na análise do comportamento mecânico da ligação GiR.

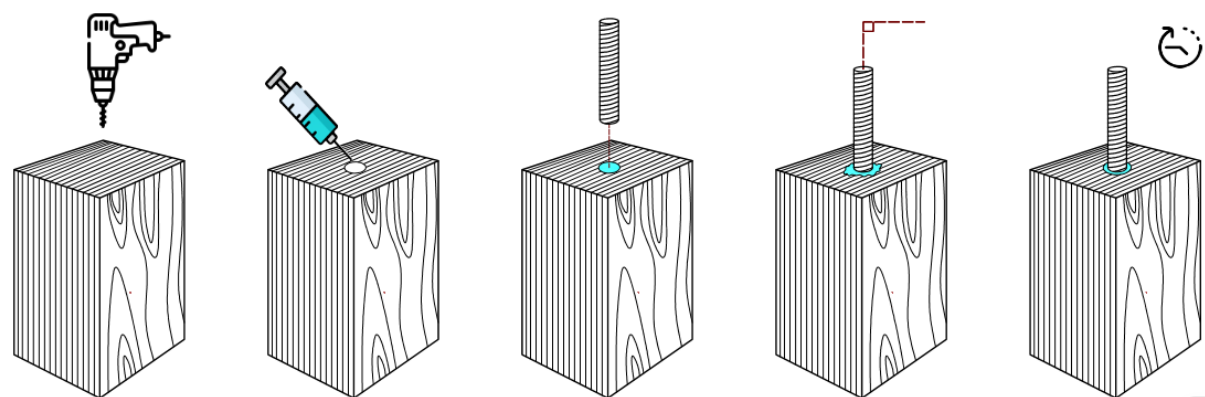
Figura 1: Variáveis geométricas dos CPs.



Fonte: Adaptado de Chans, Cimadevila e Gutiérrez (2009).

Com o auxílio de uma furadeira, foram realizados furos no centro da seção transversal, na direção longitudinal dos espécimes, com comprimentos de $10d$ (63 mm), $12,5d$ (78,75 mm) e $15d$ (94,5 mm), sendo todos de diâmetro D de 10 mm. Após a finalização desse procedimento, foi realizada a limpeza dos furos seguida do preenchimento da cavidade com o adesivo e inserção da barra de aço (Figura 2). No total foram usados 90 CPs, sendo 30 CPs para cada série. Após finalizados, os CPs foram submetidos ao ensaio de tração (*Pull-Pull*).

Figura 2: Processo de confecção dos CPs para o ensaio de *glued-in rods*.



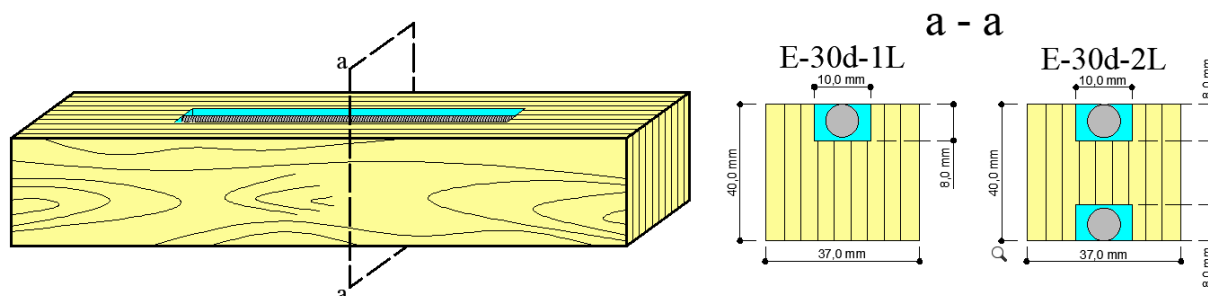
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Para o ensaio de reforço de vigas, foram usados CPs com seção transversal de $40,0 \times$

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

37,0 (mm²) e comprimento longitudinal de 43,5 cm. Para verificar a viabilidade e funcionalidade dos reforços de vigas, foram preparadas duas séries com barras de aço coladas de comprimento 30d (Figura 3). Para a primeira série foram utilizadas barras de aço coladas apenas na região sujeita aos esforços de compressão (série E-30d-1L), enquanto que para a segunda série foram empregadas barras coladas nas regiões de compressão e tração (série E-30d-2L). Além disso, foi preparado um conjunto de CPs sem barras coladas, denominado de série virgem (série V-0d-0L). Foram utilizados 30 CPs por série.

Figura 3. Geometria dos CPs com barras coladas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os CPs foram submetidos ao ensaio de flexão estática em quatro pontos. A tensão normal máxima de ruptura à flexão (MOR) dos CPs foi calculada conforme a norma ABNT NBR 7190-3:2022 - *Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*, enquanto a rigidez à flexão (MOE) foi calculada de acordo com a Equação 1, presente na norma ASTM D 198:1997 - *Standard Test Method of Static Tests of Lumber in Structural Sizes* para flexão em quatro pontos, sendo F a força do limite de proporcionalidade, L a distância entre os apoios, a a distância entre o local de aplicação da força e o apoio, b a largura do CP, h a espessura do CP e δ a deflexão no meio do vão.

$$MOE = \frac{F \cdot a}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta} \cdot (3L^2 - 4a^2) \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados para a força de arrancamento das barras de cada série. Como é possível observar, a série de 15d apresentou o maior valor médio

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

e característico, seguida da série de $12,5d$ e, por fim, da série de $10d$. Os valores característicos (F_k) foram calculados de acordo com a norma ABNT NBR 7190-3:2022.

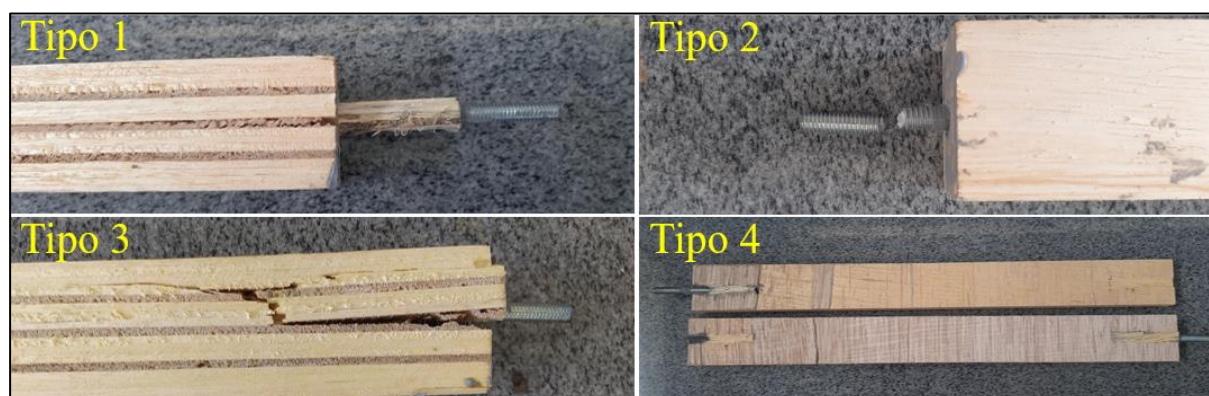
Tabela 1: Força de arrancamento das barras.

Valor	Séries		
	$10d$	$12,5d$	$15d$
Máximo (kN)	12,97	13,00	13,04
Médio (kN)	10,43 (a)	11,22 (b)	11,72 (c)
Mínimo (kN)	6,86	9,01	10,51
CV (%)	16,05	11,11	7,25
F_k (kN)	8,50	10,38	11,71

Valores de média com letras diferentes diferem estatisticamente entre si; CV: coeficiente de variação; d : diâmetro da barra. Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A Figura 4 apresenta os modos de ruptura identificados nos CPs após realização dos ensaios. Foram observados quatro modos de ruptura, denominados de Tipo 1, 2, 3 e 4. O comportamento dúctil da ligação, ideal para estruturas de edificações e decorrente da ruptura da barra de aço (Tipo 2), ocorreu, majoritariamente, na série $15d$. No estudo de Gonzales, Tannert e Vallee (2016), o modo de ruptura dúctil foi observado em 70% dos espécimes com comprimento de ancoragem de $10d$, e em 100% dos espécimes com $15d$ e $20d$ de ancoragem, na qual foi usada barra roscada de 12,7 mm de diâmetro colada em MLC da espécie Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii*).

Figura 4: Modos de ruptura dos CPs.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática em quatro pontos são apresentados

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

na Tabela 2. Em ordem decrescente dos valores de MOR, a série E-30d-2L encontra-se em primeiro lugar, com valor médio e característico igual a 60,07 MPa, seguida da série E-30d-1L, com valor médio e característico igual a 57,49 MPa, e da série V-0d-0L, com valor médio de 50,84 MPa e característico de 48,39 MPa. Quanto aos resultados de rigidez à flexão, o valor médio da série E-30d-2L é 12,21% superior ao apresentado pela série E-30d-1L, e 43,73% superior ao obtido para a série V-0d-0L.

Tabela 2: Valores de tensão e rigidez à flexão das séries de reforço de vigas.

Valor	V-0d-0L		E-30d-1L		E-30d-2L	
	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE
Máximo (MPa)	56,01	7174	65,16	9390	65,17	11240
Médio (MPa)	50,84 (a)	6597 (c)	57,49 (b)	8450 (d)	60,07 (b)	9482 (e)
Mínimo (MPa)	41,43	5971	49,93	7207	50,43	8355
CV (%)	7,47	5,93	5,33	6,29	5,21	6,41
f_k (MPa)	48,39	-	57,49	-	60,07	-

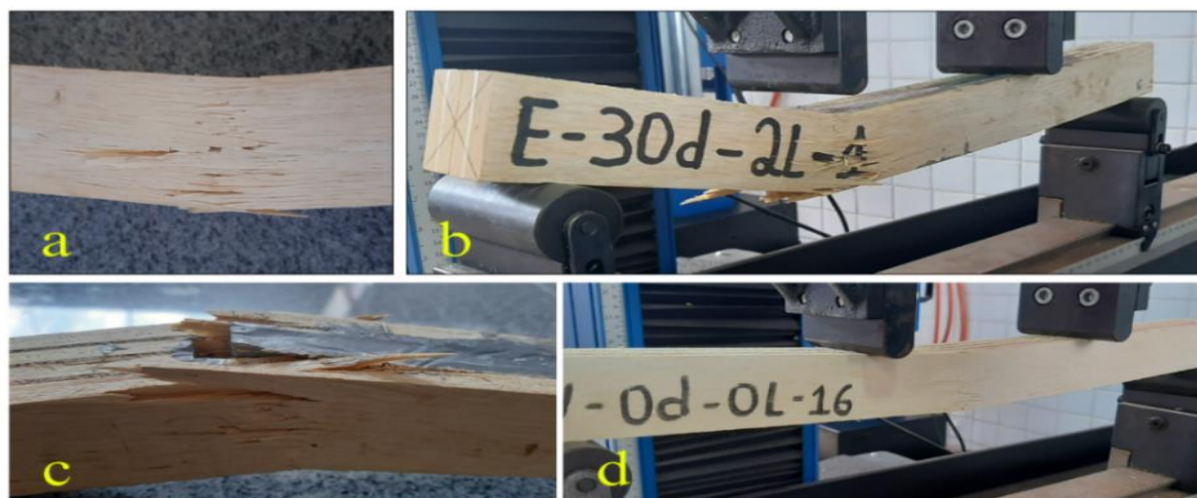
Valores de média com letras diferentes diferem estatisticamente entre si: f_k : valor característico da resistência mecânica; CV: coeficiente de variação. Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O ganho de resistência e rigidez mecânica das vigas reforçadas se deve a presença do adesivo e aço, uma vez que estes materiais possuem tais propriedades mecânicas maiores que as da madeira. No estudo de Luca e Marano (2012), na qual foi analisado o comportamento mecânico de vigas de MLC reforçadas com barras de aço roscadas de 10 mm de diâmetro, foi observado um incremento de 48,10% para a força de ruptura e 25,90% para a rigidez das vigas reforçadas com barras na região de tração e compressão.

Os modos de ruptura observados nos ensaios de flexão são apresentados na Figura 5. Nas três séries, foi observada a ruptura por compressão das fibras superiores, caracterizada pela sobreposição umas às outras, seguida pela tração das fibras inferiores, sendo indicada pela separação brusca das fibras. O local da ruptura variou entre os pontos de aplicação da carga e o meio do vão. Além disso, na série E-30d-2L, houve o destacamento da barra de aço junto ao adesivo Figura 5.c.

Figura 5. Modos de ruptura dos CPs. a) ruptura por tração e compressão, b) ruptura no local de aplicação da carga, c) destacamento da barra junto ao adesivo, d) ruptura no meio do vão.

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O comportamento mecânico observado na ruptura dos CPs da série V-0d-0L foi frágil, evidenciando uma falha súbita na estrutura. Por outro lado, as séries E-30d-1L e E-30d-2L apresentam aumento na ductilidade durante a ruptura, atribuído à introdução das barras de aço. Yang *et al.* (2016) obteve acréscimo na ductilidade de vigas de MLC quando reforçadas com barras de aço nervuradas. Esse fenômeno também foi observado no estudo de Raftery e Whelan (2014), com vigas de MLC reforçadas com GFRP (*glass fibre reinforced plastics*), e no trabalho de Luca e Marano (2012).

CONCLUSÕES

Com base na análise dos resultados experimentais dos testes tração (*pull-pull*) e flexão, o comprimento de ancoragem de $15d$ apresentou os maiores resultados de capacidade de carga e o maior número de espécimes com ruptura na barra de aço dentre as séries. O reforço das vigas com barras rosqueadas de aço coladas contribuiu positiva e significativamente na capacidade de carga e rigidez à flexão dos espécimes. O reforço com barras de aço coladas nas regiões de tração e compressão apresentou os maiores valores de resistência e rigidez mecânica à flexão. A utilização de barras de aço de reforço, em relação ao LVL não reforçado, produziu um comportamento mecânico mais uniforme e dúctil na estrutura.

APOIO FINANCEIRO

O autor agradece ao Grupo Arboris pelo fornecimento dos painéis LVL e a

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. *Standard test method of static tests of lumber in structural sizes*. ASTM D 198. Annual book of ASTM standards, v. 03.01. West Conshohocken, Philadelphia: 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190 - 3: Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*. Rio de Janeiro. 2022.

CHANS, D.O.; CIMADEVILA, J.E.; GUTIÉRREZ, E.M. Withdrawal strength of threaded steel rods glued with epoxy in wood. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2013, 44, 115–121.

DIAS, J.M. *et al.* Adequabilidade da normatização brasileira para o dimensionamento de ligações com barras de aço coladas em madeira. *Brazilian Journal of Development* 2021, 7, 12, 116145-116158.

GONZALES, E.; TANNERT, T.; VALLEE, T. The impact of defects on the capacity of timber joints with glued-in rods. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2016, 65, 33–40.

JOCKWER, R.; SERRANO, E. Glued-in Rods as Reinforcement for Timber Structural Elements. In *Reinforcement of Timber Elements in Existing Structures: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 245-RTE* 2021, 33, 29-49.

LUCA, V.; MARANO, C. Prestressed glulam timbers reinforced with steel bar. *Construction and Building Materials* 2012, 30, 206–217.

LUKIN, M. *et al.* Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. *Buildings* 2021, 11, 2, 46.

RAFTERY, G.M.; WHELAN, C. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods, *Constr. Build. Mater.* 2014, 52, 209–220.

RATSCH, N. *et al.* Influence of imperfections on the load capacity and stiffness of glued-in rod connections. *Construction and Building Materials* 2019, 226, 200–211.

YANG, H. *et al.* Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Construction and Building Materials* 2016, 106, 550–563.

Lima, V.S. *et al.* Caracterização física e mecânica de painéis LVL de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke)) colados com ureia-formaldeído. *Matéria* (Rio de Janeiro) 2023, v. 28, n. 3.