

Análise comparativa das propriedades químicas, térmicas e físico-mecânicas de três espécies de madeira

Comparative analysis of the chemical, thermal and physicommechanical properties of three wood species

Douglas Konrath¹ , Ramon Mendonça Teles¹ , Kim Lisboa Daudt Maus¹ ,
Leticia Lange¹ , Daiana Cristina Metz Arnold¹ 

¹Universidade Feevale, Centro de Construções Sustentáveis. Novo Hamburgo, RS, Brasil.

e-mail: da.konrath@gmail.com, 0151420@feevale.br, 0192073@feevale.br, projete@projeteengenharia.com, daim@feevale.br

RESUMO

A madeira permanece como insumo relevante na construção civil devido à origem renovável, ao baixo consumo energético no processamento e ao potencial de estocagem de carbono. Mesmo com redução do seu uso, o material ainda exerce funções estruturais e não estruturais. A aplicação envolve benefícios ambientais e desempenho físico satisfatório, embora existam limitações relacionadas à propagação do fogo e propriedades físico-mecânicas dependentes da umidade. O conhecimento das propriedades da madeira é fundamental para explorar seu potencial em aplicações estruturais, energéticas e estéticas. A caracterização das madeiras auxilia na correlação entre suas propriedades químicas, térmicas e mecânicas, fornecendo subsídios para a definição de aplicações mais eficientes e seguras. O objetivo do trabalho é avaliar as propriedades químicas, térmicas e físico-mecânicas de três espécies de madeira, sendo elas garapeira (*Apuleia leiocarpa*), cumarú (*Dipteryx odorata*) e itaúba (*Mezilaurus itauba*) por ensaios de FTIR, TGA, teor de umidade, densidade aparente, compressão e tração paralelas às fibras. As análises identificaram grupos funcionais, etapas de degradação térmica e diferenças de resistência e estabilidade dimensional. O Cumarú apresentou resistência à tração em U12% de 96,24 MPa, seguido pela Itaúba com 88,13 MPa, enquanto a Garapeira apresentou menor resistência à compressão de 36,41 MPa, e as três espécies demonstraram comportamento térmico semelhante, concluindo-se que a densidade e a composição estrutural influenciam o desempenho mecânico. Dessa forma destaca-se a importância de aprofundar estudos com análises integradas, como FTIR e TGA, para ampliar a correlação entre estrutura química, estabilidade térmica e resistência mecânica das madeiras.

Palavras-chave: Madeiras tropicais; Propriedades físico-mecânicas; Cumarú; Garapeira; Itaúba.

ABSTRACT

Wood remains a relevant input in civil construction due to its renewable origin, low energy consumption in processing, and carbon storage potential. Even with reduced use, the material still performs structural and non-structural functions. Its application involves environmental benefits and satisfactory physical performance, although limitations exist related to fire propagation and moisture-dependent physical-mechanical properties. Knowledge of wood properties is fundamental to exploring its potential in structural, energy, and aesthetic applications. Characterizing wood helps correlate its chemical, thermal, and mechanical properties, providing support for defining more efficient and safe applications. The objective of this work is to evaluate the chemical, thermal, and physical-mechanical properties of three wood species: garapeira (*Apuleia leiocarpa*), cumaru (*Dipteryx odorata*), and itauba (*Mezilaurus itauba*), using FTIR, TGA, moisture content, apparent density, compression, and tensile strength parallel to the fibers. The analyses identified functional groups, stages of thermal degradation, and differences in strength and dimensional stability. Cumaru showed a tensile strength in U12% of 96.24 MPa, followed by Itauba with 88.13 MPa, while Garapeira showed the lowest compressive strength of 36.41 MPa. All three species demonstrated similar thermal behavior, concluding that density and structural composition influence mechanical performance. This highlights the importance of further studies

using integrated analyses, such as FTIR and TGA, to broaden the correlation between chemical structure, thermal stability, and mechanical strength of wood.

Keywords: Tropical woods; Physical and mechanical properties; Cumaru; Garapeira; Itaúba.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um insumo utilizado desde os primórdios da história, antes mesmo do homem ter acesso a ferramentas para corte e manuseio, pois era um material facilmente encontrado na natureza e permitia com que as pessoas construíssem suas moradias. Porém, com o passar dos anos, a madeira teve seu protagonismo reduzido em função dos novos insumos que surgiram no mercado da construção civil, por exemplo, pau a pique, tijolos de barro, além do sistema de construção atual, que utiliza alvenaria, aço e concreto [1–4].

A ampla gama de finalidades no contexto da construção civil se deve à disponibilidade do material, que pode ser encontrado em áreas de manejo ou de silvicultura, além do baixo consumo energético na sua cadeia produtiva. Além disso, a utilização da madeira na construção civil contribui para a redução das emissões de carbono para a atmosfera [5, 6]. Além de seu papel ambiental, a madeira apresenta propriedades físico-químicas e térmicas que a tornam um material versátil para aplicações na engenharia, na arquitetura, no design de produtos e em sistemas de energia e conforto ambiental. Seu baixo coeficiente de condutividade térmica favorece o desempenho energético de edificações, enquanto o conforto tátil, a aceitação estética e a facilidade de processamento ampliam sua aplicabilidade em soluções funcionais e ergonômicas [7].

A madeira é constituída essencialmente por celulose, hemicelulose e lignina, sendo a celulose o principal componente estrutural, organizada em microfibrilas, que são compostas por microfibrilas, que conferem resistência mecânica, enquanto a hemicelulose atua como matriz de ligação e a lignina como agente de rigidez e durabilidade, a Figura 1 apresenta um esquema ilustrativo. Essa organização hierárquica da parede celular é responsável pelas propriedades físico-mecânicas e pela estabilidade do material em diferentes condições de uso [8–10].

O estudo das propriedades químicas, térmicas, físicas e mecânicas da madeira é fundamental para compreender seu comportamento como material natural anisotrópico e heterogêneo, permitindo prever seu desempenho diante de variações de umidade, temperatura e esforços mecânicos. Essas informações subsidiam aplicações em diferentes setores, como construção, mobiliário, painéis, energia e biomateriais, além de contribuírem para maior durabilidade, segurança e eficiência no uso dos recursos florestais. A ampliação de pesquisas com espécies tropicais fortalece a base técnica para sua especificação adequada e agrega valor à cadeia produtiva da madeira [10–14].

A madeira, como material lignocelulósico de origem renovável, apresenta comportamento estrutural e funcional diretamente influenciado por sua composição química, organização anatômica e estabilidade térmica, fatores que determinam seu desempenho físico-mecânico e sua durabilidade em serviço. Estudos recentes destacam que variações na proporção de celulose, hemiceluloses e lignina, bem como na estrutura da parede celular, impactam propriedades como resistência, rigidez, estabilidade dimensional e comportamento frente ao calor e à degradação [15–17]. Nesse contexto, a caracterização integrada dessas propriedades torna-se eficaz para ampliar o conhecimento técnico sobre espécies tropicais e subsidiar sua aplicação segura e eficiente em diferentes setores industriais.

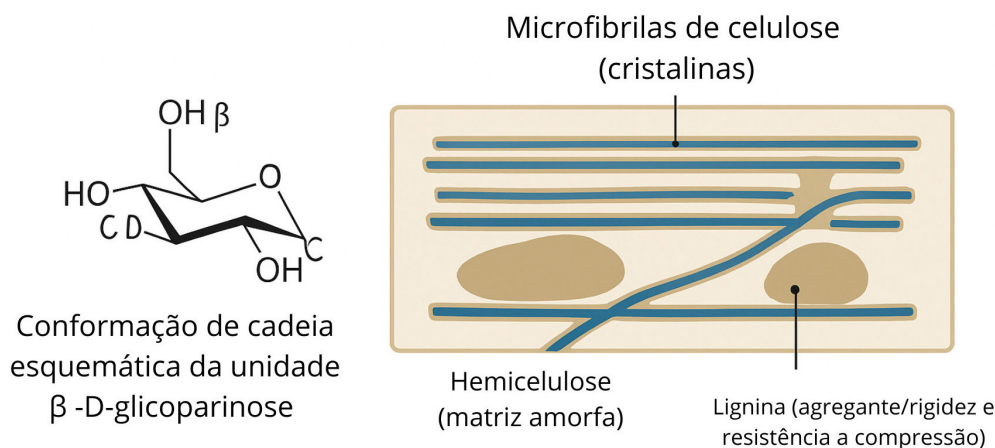


Figura 1: Representação esquemática da unidade repetitiva da celulose e sua organização microestrutural na madeira.

Este trabalho tem como objetivo comparar as propriedades químicas, térmicas e físico-mecânicas de três espécies de madeira, buscando evidenciar suas diferenças estruturais e funcionais, bem como suas potencialidades de uso. Diante do exposto, o estudo em questão pretende investigar se as madeiras do tipo garapeira, cumarú e Itaúba apresentam propriedades equivalentes e se podem ser utilizadas para as mesmas aplicações no setor da construção civil. A análise comparativa visa fornecer subsídios técnicos e científicos para a seleção adequada de cada espécie em distintas aplicações, considerando aspectos de desempenho, durabilidade e comportamento sob diferentes condições de uso.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Neste estudo, foram utilizadas amostras de madeira das espécies garapeira (*Apuleia leiocarpa*), cumarú (*Dipteryx odorata*) e itaúba (*Mezilaurus itauba*) para a realização dos ensaios de caracterização. A escolha dessas espécies baseou-se na ampla utilização dessas madeiras em estruturas de edificações. As peças de madeira das espécies estudadas foram obtidas em uma serraria localizada no Vale do Paranhana/RS. As amostras foram coletadas conforme apresentado na Figura 2, após passarem pelo processo de beneficiamento. De cada peça beneficiada, os corpos de prova foram retirados no sentido do eixo longitudinal em direção às extremidades, atendendo aos critérios estabelecidos pela [18] que recomenda comprimento mínimo equivalente a cinco vezes a menor dimensão da seção transversal, não sendo inferior a 30 cm.

Para garantir a caracterização mínima das espécies, foram preparadas 12 amostras de cada espécie para os ensaios físicos e 24 amostras de cada espécie para os ensaios mecânicos. Dessas, 12 amostras estavam secas ao ar e 12 amostras saturadas, totalizando 252 corpos de prova, seguindo as recomendações da [18].

Para as análises de FTIR, as amostras de madeira foram cortadas em tamanhos pequenos e previamente secas, sendo analisadas diretamente por meio da técnica de ATR-FTIR. Para a análise termogravimétrica (TGA), as amostras também foram cortadas em pequenos fragmentos e secas para remoção da umidade residual, utilizando-se massas representativas nos ensaios.

2.2. Métodos

As análises por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas em modo de refletância total atenuada (ATR), utilizando equipamento Spectrum Two, marca Perkin Elmer com cristal de diamante. Os espectros foram adquiridos na faixa de 4000 a 650 cm^{-1} , que abrange as principais bandas vibracionais associadas aos grupos funcionais e a região de impressão digital dos materiais. Cada espectro corresponde à média de 32 varreduras, com resolução espectral de 4 cm^{-1} . Para cada espécie foi obtido um espectro representativo, uma vez que a técnica foi empregada com caráter qualitativo. A preparação das amostras consistiu em manter em mesmas condições do ensaio de teor de umidade, mantendo-se em temperatura ambiente e selecionados cortes pequenos para realização dos testes, tanto para FTIR como para TGA.

A análise termogravimétrica (TGA) foi conduzida em atmosfera de nitrogênio, no intervalo de temperatura de 15 a 900 °C, possibilitando observar as etapas de degradação térmica e a estabilidade das amostras frente ao aquecimento. As amostras foram pesadas entre 8 e 12 mg, a uma taxa de 10°C/min e fluxo de gás nitrogênio a 50mL/min.

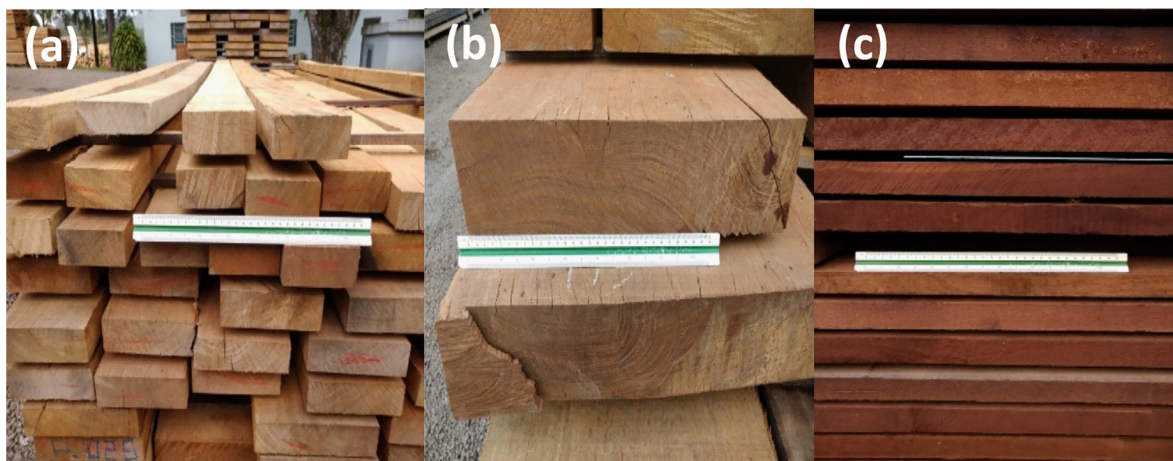


Figura 2: Madeira serrada: a) Garapeira, b) Cumarú e c) Itaúba.

Conforme a [18], os corpos de prova utilizados na caracterização física apresentaram dimensões nominais de 20 mm × 30 mm × 50 mm, sendo essas medidas determinadas com paquímetro de resolução 0,1 mm em 3 medições para cada aresta. As massas foram determinadas em balança de precisão com resolução de 0,01 g. Para a determinação do teor de umidade, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 103 ± 2 °C até atingirem massa constante, definida como a condição em que a diferença entre duas pesagens consecutivas foi inferior a 0,01 g, após resfriamento em dessecador. As leituras de massa foram realizadas em intervalos de 24 h até o atendimento desse critério. A densidade aparente foi determinada pela relação entre a massa seca e o volume dos corpos de prova, sendo posteriormente corrigida para 12% de teor de umidade com base no diagrama de Kollmann.

O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado conforme a [18], utilizando 12 corpos de prova por espécie, em mesmas condições dos demais ensaios, com dimensões de 5,0 × 5,0 × 15,0 cm. As dimensões foram medidas com paquímetro de precisão de 0,1 mm e inseridas no software da máquina universal de ensaios INSTRON EMIC DL20000. Os ensaios foram conduzidos sob carregamento monotônico crescente, com taxa aproximada de 10 MPa/min, até a ruptura do material, registrando-se a força máxima de compressão por sistema computadorizado. A resistência à compressão paralela às fibras foi determinada pela razão entre a força máxima e a área da seção transversal do corpo de prova, não sendo avaliada a rigidez devido à ausência de extensômetros. Os resultados foram organizados para a determinação da resistência característica e posteriormente corrigidos para o teor de umidade de referência de 12%, conforme indicado pela [18].

A resistência à tração paralela às fibras foi determinada conforme a [18], utilizando-se 12 corpos de prova em mesmas condições dos demais ensaios. Os corpos de prova tiveram seu formato adaptado para permitir o encaixe adequado nas garras do equipamento de ensaios disponível, mantendo-se a região central com seção transversal definida. Antes do ensaio, foram medidas as dimensões da área central com paquímetro de precisão de 0,1 mm, cujos dados foram inseridos no sistema do equipamento. Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios, com taxa de carregamento aproximada de 10 MPa/min, até a ruptura.

3. RESULTADOS

3.1. FTIR

As análises de FT-IR permitem identificar os principais grupos funcionais presentes no material, conforme evidenciado nos espectros apresentados na Figura 3, os quais refletem a composição química das diferentes espécies de madeira estudadas.

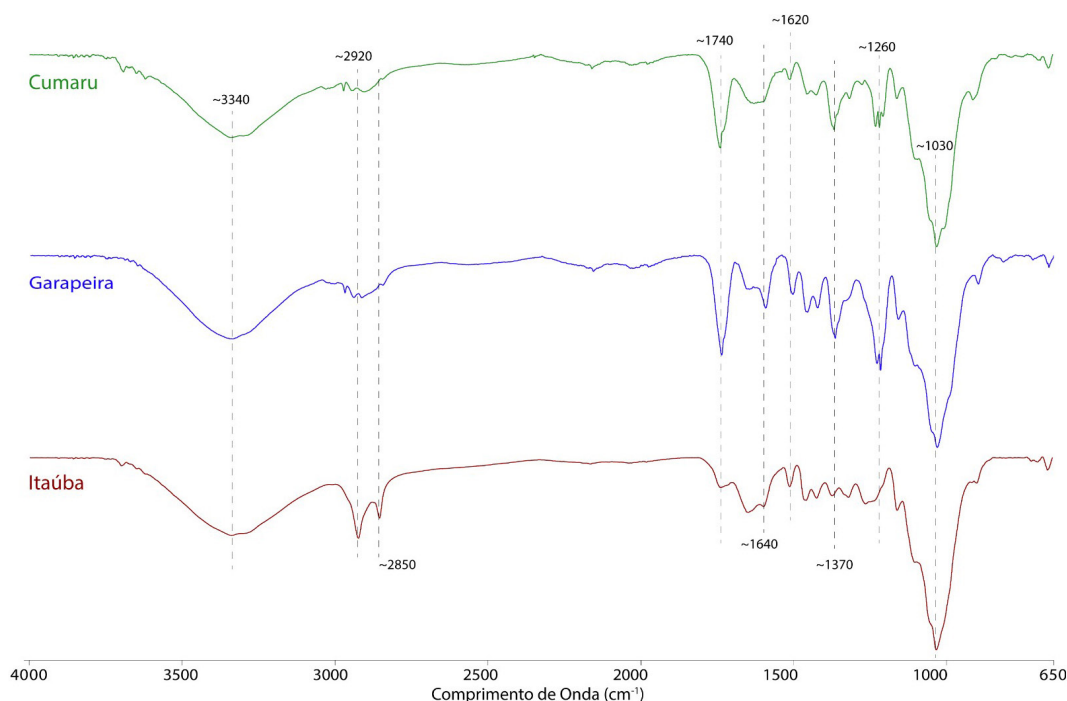


Figura 3: Espectro de FT-IR das 3 amostras de madeira.

O Quadro 1 apresenta o comparativo dos espectros obtidos por FT-IR para as 3 diferentes amostras de madeira analisadas. Nesse quadro, são destacadas as principais bandas de absorção identificadas nos espectros, bem como suas respectivas atribuições aos grupos funcionais característicos

Os espectros FTIR obtidos neste trabalho para as madeiras cumaru (*Dipteryx odorata*) e garapeira (*Apuleia leiocarpa*) apresentam boa concordância com os resultados reportados por [19], que utilizaram espectroscopia no infravermelho para avaliar alterações químicas em madeiras submetidas a intemperismo acelerado. Observou-se coincidência nas bandas características da matriz lignocelulósica, especialmente na região de $\sim 1740\text{ cm}^{-1}$, associada a grupos carbonila da hemicelulose e extrativos, nas bandas de $\sim 1370\text{--}1329\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 1230\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$, atribuídas a vibrações C–H e C–O de celulose e hemicelulose, bem como na banda ampla de estiramento O–H em torno de $\sim 3340\text{ cm}^{-1}$. A região associada às vibrações aromáticas da lignina ($\sim 1595\text{--}1510\text{ cm}^{-1}$) foi claramente identificada na garapeira, enquanto no cumaru apresentou menor evidência, comportamento compatível com variações de intensidade relatadas [19] após envelhecimento artificial. As pequenas diferenças observadas podem ser atribuídas à composição química específica de cada espécie e às condições experimentais de aquisição dos espectros.

Os resultados de FTIR obtidos neste trabalho para o cumaru (*Dipteryx odorata*) e a itaúba (*Mezilaurus itauba*) estão em concordância com o estudo de [20], que utilizaram a espectroscopia no infravermelho para evidenciar diferenças estruturais entre espécies de madeira. Em ambos os casos, observa-se a banda ampla de estiramento O–H em torno de $\sim 3340\text{ cm}^{-1}$, bem como as bandas características de estiramento C–O e C–O–C de celulose e hemicelulose nas regiões de $\sim 1260\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 1030\text{ cm}^{-1}$. A presença das bandas alifáticas em ~ 2920 e $\sim 2850\text{ cm}^{-1}$ na itaúba, contrastando com sua menor evidência no cumaru, é compatível com as variações composicionais atribuídas pelos autores a diferenças no teor de extrativos. Assim, os espectros obtidos corroboram a interpretação de que a composição química específica de cada espécie influencia diretamente seu comportamento espectral em FTIR.

O espectro de FTIR das três espécies de madeira evidência diferentes bandas características que refletem a composição química de cada madeira. A região em torno de 3300 cm^{-1} está associada a estiramentos de O–H, indicando a presença de celulose e hemicelulose, componentes estruturais essenciais da parede celular da madeira. Essas diferenças de intensidade nessa faixa podem sugerir variações na disponibilidade de grupos hidroxila entre as espécies, conforme observado por [21, 22]. As bandas próximas de 2900 cm^{-1} , como visto no espectro da Itaúba, correspondem a estiramentos C–H de grupos metil e metileno, encontrados tanto na lignina quanto na celulose. Estudos recentes, como os de [22, 23], mostram que alterações na intensidade dessas bandas

Quadro 1: Quadro comparativo FT-IR das madeiras analisadas.

REGIÃO (cm^{-1})	CUMARU	GARAPEIRA	ITAÚBA	ATRIBUIÇÃO TÍPICA
~ 3340	3340,9	3339,9	3336,7	Estiramento O–H (celulose, hemicelulose e lignina – hidroxilas, umidade ligada)
~ 2920	–	–	2922,1	Estiramento C–H assimétrico (grupos alifáticos – celulose e extrativos)
~ 2850	–	–	2852,9	Estiramento C–H simétrico (cadeias alifáticas)
~ 1740	1738,5	1737,6	–	Estiramento C=O (hemicelulose, grupos acetilados, extrativos)
$\sim 1640\text{--}1630$	1627,2	–	1644,6	Flexão O–H da água adsorvida/ligações conjugadas aromáticas
$\sim 1595\text{--}1510$	–	1593,8	1509,6	Vibrações do anel aromático (lignina)
$\sim 1456\text{--}1420$	–	1456,3	1456,2/1421,6	Deformação C–H (celulose e lignina)
~ 1370	1366,1	1366,0	–	Deformação C–H (celulose/hemicelulose)
$\sim 1260\text{--}1217$	1217,3	1217,4	1261,5/1158,2	Vibração C–O (lignina e hemicelulose)
~ 1030	1029,8	1031,9	1030,2	Estiramento C–O–C/C–O (celulose e hemicelulose)
~ 670	–	–	666,7	Vibrações fora do plano (possíveis aromáticos/extrativos)

refletem variações no teor de lignina e na degradação térmica de componentes orgânicos, sendo úteis para compreender o comportamento químico da madeira sob diferentes condições.

Já a faixa entre 1000 e 1600 cm^{-1} apresenta sinais de deformações e estiramentos de C–O, C–C e C–O–C, refletindo a estrutura polimérica da madeira e a presença de açúcares. Pequenas variações nessas regiões entre Itaúba, Garapeira e Cumarú indicam diferenças na proporção de lignina, celulose e extrativos, como taninos e óleos, que podem influenciar características físicas, térmicas e de durabilidade, conforme discutido por [21, 24], que destacam a importância dessa faixa espectral na distinção entre espécies e na análise de degradação. Comparando as espécies, observa-se que a Itaúba apresenta bandas mais intensas na região de O–H, sugerindo maior teor de hidroxilas livres, enquanto Garapeira e Cumarú exibem espectros relativamente semelhantes. Entretanto, sutis diferenças na faixa de 1000–1500 cm^{-1} , levam a hipóteses de que há variações na estrutura polimérica interna, refletindo possíveis diferenças na resistência mecânica e no comportamento térmico dessas madeiras. Tais relações também foram apontadas por [21, 25, 26], ao demonstrarem que a intensidade e o deslocamento das bandas podem estar diretamente associados à densidade e durabilidade natural de espécies tropicais.

3.2. TGA

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam as curvas de TGA e DTG correspondentes às madeiras analisadas, evidenciando o comportamento térmico e as etapas de decomposição características de cada espécie ao longo do aquecimento.

A curva termogravimétrica obtida para a amostra evidencia dois estágios predominantes de perda de massa, característicos de materiais de origem lignocelulósica [27, 28]. O primeiro estágio ocorre em temperaturas mais baixas e está associado à evaporação da umidade superficial e de compostos voláteis leves, resultando em uma perda de massa de cerca de 4,59%. Esse comportamento, que se inicia próximo de 20 °C e atinge seu pico em torno de 70,72 °C, indica a presença de pequena quantidade de água fisicamente adsorvida e substâncias orgânicas facilmente removíveis, onde tal comportamento já é esperado em madeiras com baixo teor de umidade [10].

O segundo estágio corresponde à fase mais intensa do processo de degradação térmica, iniciando-se por volta de 320 °C e alcançando uma perda de massa de aproximadamente 60,08%. O pico de máxima degradação ocorre em 362,14 °C, com uma taxa de $-10,503\%/min$, indicando uma rápida despolimerização dos principais constituintes da madeira, especialmente a celulose e a hemicelulose. Nessa faixa de temperatura ocorre a pirólise, com desprendimento de gases e compostos orgânicos voláteis, fenômeno que marca a quebra das cadeias poliméricas e a consequente desestruturação do material [29, 30].

As temperaturas de início e de pico da decomposição demonstram que a madeira mantém estabilidade térmica até cerca de 300 °C, ponto a partir do qual a degradação se intensifica. O processo de perda de massa se estabiliza próximo de 570 °C, restando um resíduo carbonizado de cerca de 23%, formado principalmente por

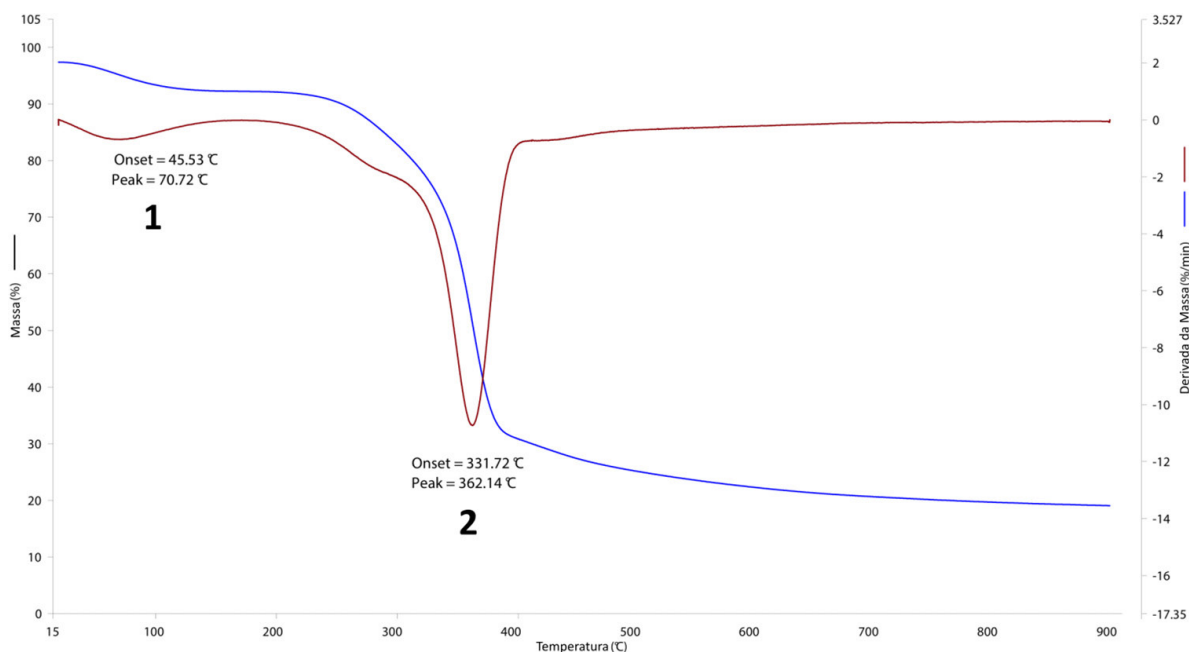


Figura 4: Resultados de TGA e DTG da madeira cumarú.

lignina e frações inorgânicas. Esse comportamento confirma a resistência térmica típica de madeiras duras com características estruturais, e os resultados obtidos são relevantes para estudos comparativos de estabilidade e para a previsão do desempenho do material sob condições de aquecimento ou combustão.

A análise da curva TGA da amostra de garapeira mostra duas etapas distintas de perda de massa. A primeira ocorre em temperaturas mais baixas, correspondendo à eliminação de umidade e de compostos voláteis leves [10]. A segunda etapa representa a principal fase de decomposição, associada à degradação dos constituintes orgânicos da madeira, como hemicelulose, celulose e lignina. Essa fase concentra a maior parte da perda de massa total, indicando a transformação térmica mais significativa do material. Na curva DTG, observa-se a taxa de perda de massa ao longo do aquecimento, revelando dois picos de decomposição.

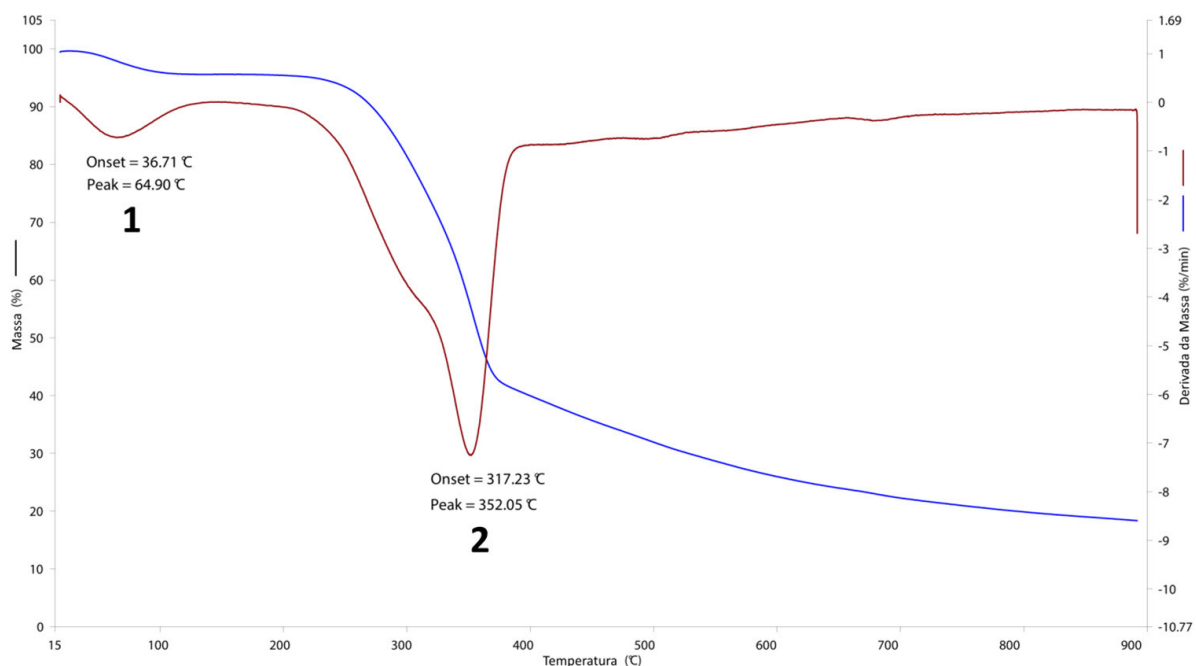


Figura 5: Resultados de TGA e DTG da madeira Garapeira.

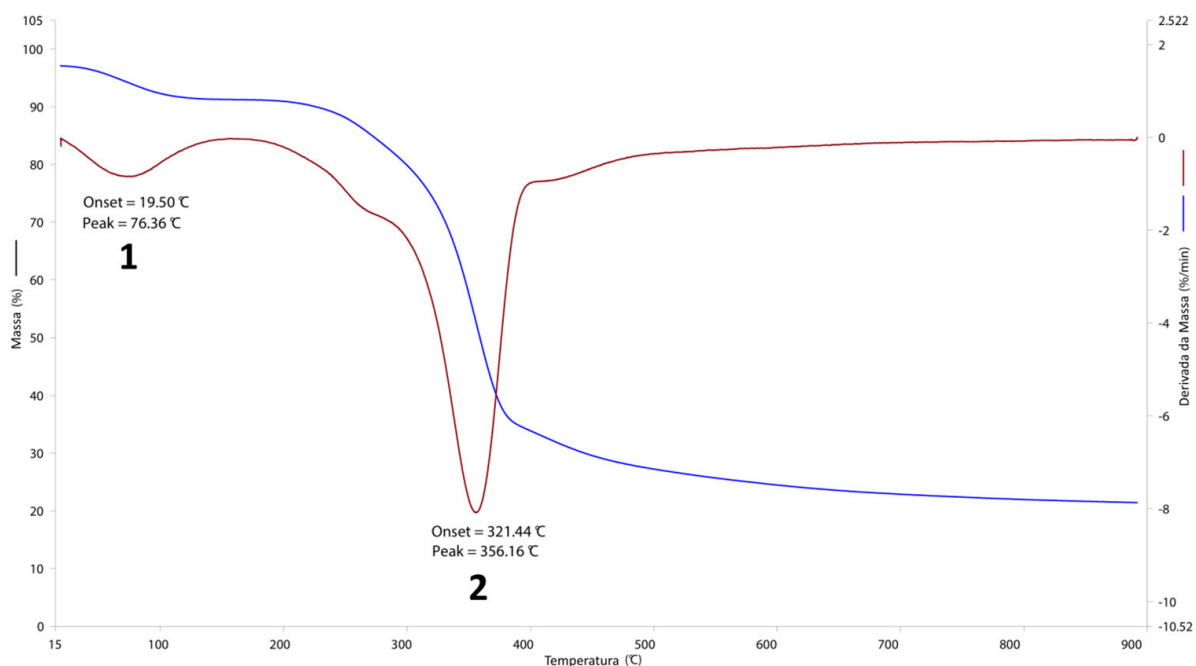


Figura 6: Resultados de TGA e DTG da madeira Itaúba.

O primeiro, de baixa intensidade, corresponde à evaporação de água e compostos voláteis. O segundo, mais intenso, representa a decomposição rápida da fração celulósica, caracterizando o ponto de maior atividade térmica do material. Essa etapa indica a temperatura em que a estrutura da madeira se rompe de forma acelerada, liberando grande quantidade de gases e voláteis [28, 31]. As temperaturas de início e de pico da decomposição permitem avaliar a estabilidade térmica da garapeira. O início da degradação principal ocorre em torno de 300 °C, enquanto o pico máximo está próximo de 352 °C. Esses valores indicam que a madeira apresenta boa estabilidade térmica até aproximadamente 300 °C, sendo adequada para aplicações que não envolvam exposição a temperaturas elevadas. Tais parâmetros são fundamentais para comparar o comportamento térmico entre diferentes espécies de madeira ou materiais modificados.

A análise termogravimétrica mostra que o material passa por duas etapas principais de perda de massa ao longo do aquecimento. Na primeira, que ocorre em temperaturas relativamente baixas, observa-se uma pequena redução de cerca de 4,6% da massa total. Essa perda é atribuída à evaporação da água retida fisicamente nas cavidades da madeira e à liberação de compostos voláteis de baixa massa molar [10]. O início dessa etapa ocorre próximo de 45 °C e o ponto de maior taxa de perda é observado a 70 °C, indicando um comportamento típico de secagem e eliminação de constituintes menos estáveis termicamente. A segunda etapa está associada à decomposição dos componentes estruturais da madeira. A degradação tem início próximo de 330 °C e apresenta um pico de máxima velocidade em torno de 362 °C, atingindo uma taxa de -10,503%/min. Nesse intervalo, há intensa ruptura das cadeias de celulose e hemicelulose, resultando em liberação de gases, vapores orgânicos e formação de resíduos carbonosos. A acentuada variação de massa, próxima de 60%, demonstra que essa é a principal fase de transformação térmica do material, onde ocorre a desestruturação completa da matriz lignocelulósica.

A partir das temperaturas características observadas, pode-se afirmar que a madeira mantém estabilidade térmica satisfatória até cerca de 300 °C. Acima dessa faixa, o processo de degradação se intensifica e prossegue até aproximadamente 500 °C, quando a taxa de perda se torna quase constante. O resíduo remanescente, de cerca de 35% da massa inicial, é composto predominantemente por lignina e material carbonizado, evidenciando a presença de frações resistentes à decomposição térmica. Esse comportamento indica boa resistência ao calor e sugere potencial uso da madeira em aplicações que demandem moderada estabilidade térmica. A Tabela 1 apresenta um compilado dos resultados obtidos através da análise de TGA e DTG e a Figura 7 compara os resultados obtidos.

As três madeiras apresentam comportamento térmico semelhante na primeira etapa, com perda de massa baixa, 3,8 a 4,6%, correspondente à remoção de umidade e voláteis leves. Isso indica que todas são relativamente estáveis em baixas temperaturas, sendo adequadas para uso em ambientes internos, secagem controlada ou aplicações de marcenaria. Na segunda etapa, a Itaúba e o Cumarú apresentam maior perda de massa, próximo a 60%, e taxas de decomposição mais altas, refletindo maior teor de celulose e lignina. Isso sugere que essas espécies poderiam ser mais eficientes como biomassa para geração de energia ou em aplicações que exigem resistência térmica inicial, enquanto a Garapeira, com menor perda de massa de 45,4% e taxa de decomposição mais baixa, pode ser preferida para estruturas que necessitam de estabilidade térmica prolongada [32].

As análises termogravimétricas (TGA) das espécies Cumarú, Garapeira e Itaúba permitiram identificar cinco estágios distintos de degradação térmica. O Estágio I está associado principalmente à perda de umidade e de compostos voláteis leves presentes na estrutura da madeira. No Estágio II ocorre o início da degradação dos constituintes menos estáveis, predominantemente a hemicelulose. O Estágio III corresponde à principal etapa de decomposição térmica, relacionada majoritariamente à degradação da celulose, com continuidade da decomposição da hemicelulose. Nos Estágios IV e V observa-se uma degradação mais gradual de componentes termoestáveis, acompanhada da formação de resíduo carbonizado, refletindo a maior estabilidade térmica das

Tabela 1: Principais parâmetros obtidos através da TGA/DTG das amostras de madeira.

MADEIRA	EVENTO DE DEGRADAÇÃO	ONSET (°C)	PICO (°C)	PERDA DE MASSA (%)
Cumarú	1	45.53	70.72	4.59
	2	331.72	362.14	60.08
Garapeira	1	36.71	64.9	3.8
	2	317.23	352.0	45.4
Itaúba	1	19.50	76.36	4.1
	2	321.44	356.16	59.35

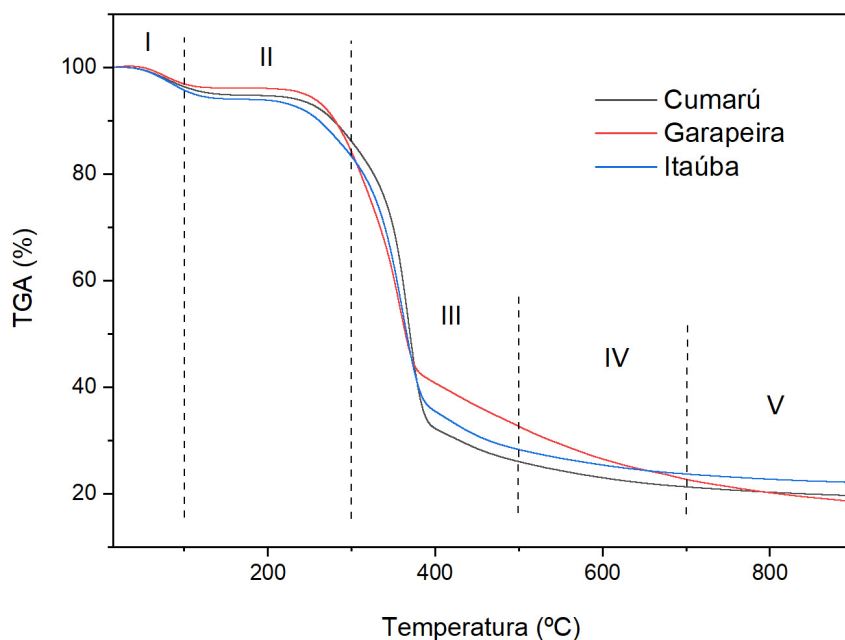


Figura 7: TGA das madeiras analisadas.

Tabela 2: Perda de massa de três espécies de madeira em função das faixas de temperature.

ESPÉCIE	PERDA DE MASSA (%)					MASSA RESIDUAL (%)
	ESTÁGIO I 25 – 100 (C°)	ESTÁGIO II 100 – 300 (C°)	ESTÁGIO III 300 – 500 (C°)	ESTÁGIO IV 500 – 700 (C°)	ESTÁGIO V 700 – 900 (C°)	
Cumarú (Dipteryx odorata)	3,68	13,87	74,02	78,77	80,44	19,56
Garapeira (Apuleia leiocarpa)	3,14	15,79	67,39	77,36	81,54	18,46
Itaúba (Mezilaurus itauba)	4,32	16,69	71,76	76,36	77,95	22,05

frações ligninocelulósicas. A maior massa residual observada para a madeira de Itaúba indica maior contribuição de constituintes termooestáveis em comparação às demais espécies [33].

Revisões recentes, como a de [33], destacam que a umidade influencia a degradação térmica da madeira principalmente por atuar como dissipador de calor e como reagente químico durante a decomposição. No estágio inicial da análise termogravimétrica (TGA), a evaporação da água ocorre de forma endotérmica, absorvendo energia e podendo retardar o início da degradação, o que altera a estabilidade térmica aparente e a cinética de decomposição [15–17]. Nos resultados obtidos neste estudo, a *Mezilaurus itauba* apresentou maior perda de massa no estágio inicial, indicando comportamento diferenciado possivelmente associado à interação entre teor de umidade e composição química, corroborando a influência determinante da umidade nas etapas iniciais da degradação térmica.

3.3. Teor de umidade e densidade aparente

As análises realizadas permitiram determinar o teor de umidade aparente das espécies de madeira estudadas, conforme a Figura 8, a partir da massa inicial e da massa seca dos corpos de prova, ajustando-se a umidade pelo diagrama de Kollmann.

As perdas de massa observadas nas etapas iniciais da TGA apresentam comportamento semelhante entre as espécies, indicando que as variações de teor de umidade não se refletem em diferenças marcantes no comportamento térmico até 300 °C. Embora a Garapeira apresente o maior teor de umidade entre as madeiras

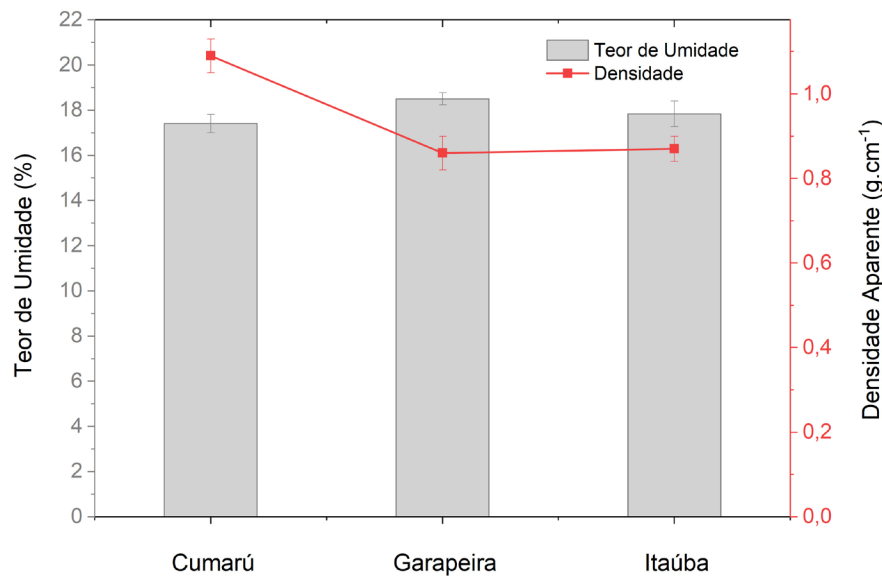


Figura 8: Correlação do Teor de umidade e densidade.

analisadas, esse fator não se traduz em maior degradação térmica nas faixas iniciais de temperatura, sugerindo que a água presente está predominantemente associada à umidade adsorvida, sem influência direta nos mecanismos de decomposição térmica.

Diferenças tornam-se mais evidentes nas faixas de temperatura mais elevadas, associadas à degradação da celulose e da lignina. Nesses estágios, o Cumarú, que apresenta a maior densidade aparente, exibe os maiores percentuais de perda de massa, indicando maior concentração de material lignocelulósico por unidade de volume. A Garapeira não apresenta maior degradação térmica nessas etapas, reforçando que o teor de umidade não governa o comportamento térmico em temperaturas mais elevadas, enquanto a densidade e a composição química assumem papel predominante [33].

As médias gerais apresentadas mostram que mesmo as madeiras secas ao ar apresentam variação de 10 a 20% de umidade, acima do padrão de 12% recomendado pela [34] para uniformização da resistência mecânica [35, 36]. A garapeira (*Apuleia leiocarpa*) apresentou a maior média de teor de umidade quando comparada as demais espécies deste estudo, com resultado de 18,50%, seguido da itaúba (*Mezilaurus itauba*), que obteve média de 17,84% e por fim o cumarú (*Dipteryx odorata*) que resultou em 17,41%.

Nos estudos de [37, 38], os autores encontraram para garapeira o teor de umidade de 20,75% e 9,80%, respectivamente, e justificam a discrepância de valores quando comparados, pelo fato dos ensaios de [37] terem sido realizados no período chuvoso do ano e de [38] no período seco. Pois devido a situação climática, a madeira por se tratar de um material higroscópico, absorve água do ambiente, consequentemente, o material retirado no período chuvoso se encontra com maior teor de umidade. Observa-se que a densidade variou entre as espécies analisadas, sendo maior para o cumaru e menor para as demais. Essa diferença está relacionada à estrutura anatômica e ao teor de extrativos de cada madeira, que influenciam diretamente a massa específica. De acordo com [39], madeiras de maior densidade tendem a apresentar melhor desempenho mecânico e maior durabilidade natural, características que as tornam mais adequadas para aplicações estruturais e em ambientes sujeitos à umidade.

A madeira é um material higroscópico que troca água com o ambiente até atingir um equilíbrio higroscópico com a umidade relativa do ar, o que determina seu teor de umidade e afeta diretamente propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Conforme discutido por [40], a água na madeira existe em diferentes estados, ligada e livre, e sua magnitude depende da umidade relativa do ar e da temperatura, influenciando a sorção e a dessorção de vapor d'água nas paredes celulares e nos poros. Quando a umidade relativa aumenta, a madeira absorve vapor d'água até estabilizar seu teor de umidade; quando diminui, ocorre liberação de água para o meio.

3.4. Tração e compressão paralela às fibras

A Figura 9 apresenta os valores de resistência característica à compressão e à tração dos corpos de prova avaliados na condição de umidade com teor de umidade de 12%, permitindo comparação das propriedades mecânicas do material entre as espécies.

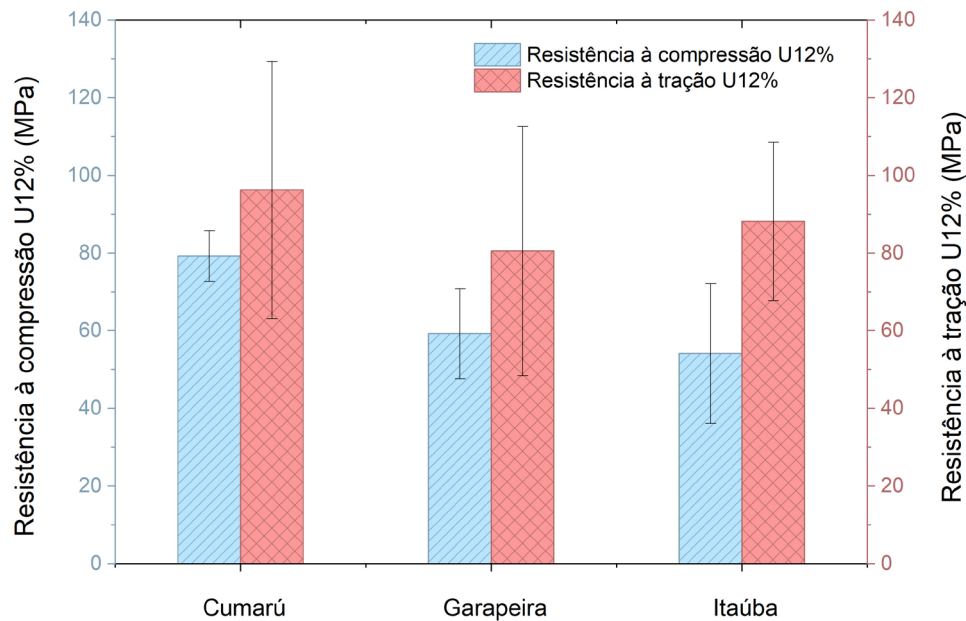


Figura 9: Resistência característica à compressão e tração para corpos de prova com teor de umidade em 12%.

Com base nos valores característicos de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0k}) obtidos a 12% de umidade, conforme a [34], o Cumaru enquadra-se na classe de resistência D60, enquanto a Garapeira e a Itaúba enquadram-se na classe D40, evidenciando o elevado potencial estrutural dessas espécies.

Comparando as espécies, o Cumaru se destacou com os maiores valores, especialmente na resistência à tração em U12% de 96,24 MPa, consolidando-se como a madeira de melhor desempenho. A Itaúba apresentou resultados intermediários, porém com elevada resistência à tração de 78,58 MPa saturada e 88,13 MPa U12%, próxima ao desempenho do Cumaru. Já a Garapeira obteve os menores valores, principalmente na compressão saturada de 36,41 MPa, caracterizando-se como a espécie menos resistente do grupo. A Tabela 2 traz um compilado de todos os resultados analisados no presente estudo.

Comparando a resistência à compressão paralela às fibras obtida neste estudo para *Dipteryx odorata* (79,26 MPa) com o valor de 91,04 MPa reportado por [41], verifica-se que o resultado experimental é aproximadamente 13% inferior ao apresentado na literatura. Apesar dessa diferença, ambos os valores situam-se na mesma ordem de grandeza, indicando comportamento mecânico compatível para a espécie. A variação observada pode estar associada à variabilidade natural da madeira, à densidade e às características estruturais das amostras.

O cumaru apresentou os maiores valores de resistência à compressão e à tração, seguido pela Itaúba e, por último, pela garapeira. Essa variação está associada à maior densidade e ao arranjo mais compacto das fibras do cumaru, o que resulta em melhor desempenho mecânico. Segundo [42], madeiras com maior proporção de celulose cristalina e menor teor de hemicelulose tendem a exibir picos mais intensos na região de 3330 cm^{-1} no espectro de infravermelho, indicando ligações de hidrogênio mais estáveis que contribuem para maior rigidez estrutural. Assim, a correlação entre os resultados mecânicos e a estrutura molecular observada por FTIR reforça o papel da composição química na resistência das madeiras analisadas.

Essas variações podem ser atribuídas à densidade aparente, teor de extrativos e proporção entre lenho tardio e lenho inicial, fatores que influenciam diretamente o comportamento mecânico da madeira [43, 44]. De acordo com [45], espécies de alta densidade, como o Cumaru e a Itaúba, tendem a manter melhor desempenho estrutural sob saturação, devido à menor permeabilidade e maior compactação das fibras. Já [46] destacam que o comportamento distinto entre compressão e tração pode estar relacionado à orientação dos vasos e à anisotropia natural do material, características típicas das madeiras tropicais.

Segundo [6, 45], a escolha da espécie deve considerar não apenas a resistência, mas também fatores como estabilidade frente à umidade e durabilidade natural, os quais estão diretamente relacionados à composição química e à proporção de lenho tardio em cada madeira.

O desempenho mecânico das espécies analisadas demonstra forte relação com a densidade aparente, teor de umidade e composição química, fatores que atuam de forma integrada no comportamento estrutural da

madeira. Espécies mais densas, como o Cumaru e a Itaúba, apresentam arranjo celular mais compacto e menor permeabilidade, o que contribui para maior resistência à compressão e à tração, inclusive em condição U12%. Conforme discutido por [40], a água adsorvida nas paredes celulares modifica as ligações de hidrogênio e o equilíbrio higroscópico, influenciando rigidez e estabilidade dimensional. Assim, a interação entre umidade e estrutura celular explica parte das diferenças observadas entre as espécies avaliadas.

Sob a perspectiva termoquímica, estudos como o de [47] demonstram que a estabilidade térmica da madeira está diretamente relacionada à proporção de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, fatores que influenciam tanto o perfil de degradação observado em TGA quanto as bandas características identificadas por FTIR. Dessa forma, a correlação entre estrutura molecular e resposta térmica auxilia na compreensão do desempenho mecânico das espécies avaliadas. Além disso, os valores de desvio padrão obtidos indicam certa sobreposição entre os resultados, sugerindo que, apesar das diferenças nos valores médios, as amostras tendem a apresentar comportamento estrutural e térmico semelhante dentro da variabilidade experimental observada.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar comparativamente o comportamento físico, mecânico e térmico das madeiras Cumarú, Itaúba e Garapeira, considerando parâmetros como densidade aparente, teor de umidade, resistência à compressão e à tração, além do perfil de degradação térmica por TGA, buscando estabelecer correlações entre estrutura, composição e desempenho para subsidiar sua aplicação na construção civil.

Os resultados quali-quantitativos demonstraram que o Cumarú apresentou os maiores valores de resistência mecânica, com destaque para a resistência à tração em U12% de 96,24 MPa, além de maior desempenho em compressão, confirmando sua superioridade estrutural. A Itaúba apresentou comportamento intermediário, com resistência à tração de 88,13 MPa em U12%, enquanto a Garapeira obteve os menores valores, especialmente na compressão de 36,41 MPa. Em relação à umidade aparente, as três espécies apresentaram valores próximos, variando entre 17,41% e 18,50%, indicando que a diferença de 1,09% não representa fator decisivo na seleção do material. Na análise térmica, as espécies mostraram faixas de degradação e percentuais de perda de massa semelhantes, com início de decomposição em temperaturas próximas e perfis compatíveis de estabilidade térmica.

A importância desses resultados reside na demonstração de que, embora as espécies apresentem comportamento térmico semelhante, diferenças estruturais e químicas influenciam diretamente o desempenho mecânico e a aplicação recomendada. Assim, o estudo contribui tecnicamente para a seleção racional de madeiras na construção civil, permitindo que a escolha da espécie seja fundamentada em dados experimentais que relacionam densidade, resistência, estabilidade dimensional e resposta térmica às exigências específicas de serviço.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] ZARRILLO, A., “The history of wood in constructions between past and present”, *Modern Environmental Science and Engineering*, v. 5, n. 11, pp. 1027–1032, 2019.
- [2] DING, Y., PANG, Z., LAN, K., *et al.*, “Madeira projetada emergente para aplicações em construção”, *Chemical Reviews*, v. 123, n. 5, pp. 1843–1888, 2022. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00450>. PubMed PMID: 36260771.
- [3] WANG, R., HALLER, P., “Applications of wood ash as a construction material in civil engineering: a review”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 15, pp. 1–21, 2022.
- [4] SILVA, M.A., CORRÊA, D.R., SANTOS, J.P., “Structural performance and technological characterization of tropical hardwoods used in civil construction”, *Construction & Building Materials*, v. 392, pp. 131931, 2023.
- [5] GALVÃO, M.L., NOBRE, J.R.C., BALBONI, B.M., *et al.*, “Avaliação da aptidão da madeira de mangue para diferentes usos”, *Journal of Wood Science*, v. 71, n. 1, pp. 13, 2025.
- [6] THOMPSON, R.J., LEE, C.H., “Mechanical behavior and durability assessment of South American hardwoods for sustainable construction”, *Journal of Building Engineering*, v. 80, pp. 108460, 2024.
- [7] NAJJOUN, N., GRIMI, N., BENALI, M., *et al.*, “Extraction and chemical features of wood hemicelluloses: a review”, *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 311, n. Pt 4, pp. 143681, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143681>. PubMed PMID: 40316123.
- [8] ALVARELI, L. G., “Avaliação de um tratamento enzimático para a produção de celulose nanocristalina e recuperação dos açúcares solubilizados em alta concentração”, Tese de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, Lorena, 2018.

- [9] ZHU, Y., LI, L., “Wood of trees: Cellular structure, molecular formation, and genetic engineering”, *Journal of Integrative Plant Biology*, v. 66, n. 3, pp. 443–467, 2024. doi: <https://doi.org/10.1111/jipb.13589>. PubMed PMID: 38032010.
- [10] OSVALDOVA, L., JANIGOVA, I., QUICKLY, J., “Termogravimetria não isotérmica de madeiras tropicais selecionadas e sua degradação sob fogo usando calorimetria de cone”, *Polymers*, v. 13, n. 5, pp. 708, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13050708>.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 15575-1 Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais*, Rio de Janeiro, ABNT, 2021.
- [12] WANG, J.Y., STIRLING, R., MORRIS, P.I., *et al.*, “Durability of mass timber structures: a review of the biological risks”, *Wood and Fiber Science*, v. 50, n. Special, pp. 110–127, 2018. doi: <https://doi.org/10.22382/wfs-2018-045>.
- [13] LIMA, D. F., TENÓRIO, M., BRANCO, J., *et al.*, “The wood moisture factor on the biological deterioration of wooden structures”, *REHABEND - Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*, pp. 690-697, 2022.
- [14] RODRIGUES, Á.G.K., “Dimensionamento de estruturas de madeira tropical utilizando a densidade básica-madeira seca”, Tese de D.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- [15] BENÍTEZ, V., FRANCO, J., CAMARGO, Á., *et al.*, “Influence of initial woodmoisture on decay process by two brown-rot fungi”, *Maderas. Ciencia y Tecnología*, v. 23, n. 34, pp. 1–12, 2021. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2021000100434>.
- [16] MENSAH, R.A., JIANG, L., RENNER, J.S., *et al.*, “Characterisation of the fire behaviour of wood: from pyrolysis to fire retardant mechanisms”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 148, n. 4, pp. 1407–1422, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11442-0>. PubMed PMID: 35910335.
- [17] POSTAWA, K., FAŁTYNOWICZ, H., SCZYGIEŁ, J., *et al.*, “Analyzing the kinetics of waste plant biomass pyrolysis via thermogravimetry modeling and semi-statistical methods”, *Bioresource Technology*, v. 344, n. Pt B, pp. 126181, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126181>. PubMed PMID: 34755652.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7190-3 Projetos de estruturas de madeira - Parte 3: Métodos de ensaio para prova de isentos de corpos de madeiras de plantas nativas*, Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- [19] JANKOWSKA, A., REDER, M., GOŁOFIT, T., “Comparative study of wood color stability using accelerated weathering process and infrared spectroscopy”, *Wood Research*, v. 62, n. 4, pp. 549–556, 2017.
- [20] POLETTI, Zattera, A.J., Santana, R.M.C., “Structural differences between wood species: Evidence from chemical composition, FTIR spectroscopy, and thermogravimetric analysis”, *Journal of Applied Polymer Science*, v. 126, n. S1, pp. E337–E344, 2012. doi: <https://doi.org/10.1002/app.36991>.
- [21] JESUS, E., FRANCA, T., CALVANI, C., “Making wood inspection easier: FTIR spectroscopy and machine learning applied to discrimination of native Brazilian species”, *RSC Advances*, v. 14, n. 11, pp. 7283–7289, 2024. doi: <https://doi.org/10.1039/D4RA00174E>. PubMed PMID: 38433943.
- [22] JAVIER-ASTETE, J., “FTIR-ATR and near-infrared spectroscopy for chemical characterization of Calycophyllum spruceanum and Guazuma crinita woods”, *Forests*, v. 12, n. 11, pp. 1509, 2021.
- [23] CARNEIRO, A.C.O., Carvalho, A.M.M.L., Freitas, T.P., *et al.*, “FTIR spectroscopy and technological characterization of heat treated Fraxinus excelsior wood”, *Cerne*, v. 29, pp. e-103264, 2023. doi: <https://doi.org/10.1590/01047760202329013264>.
- [24] LI, R.; ZHANG, Z.; JIAO, L.; YIN, Y.; TIE, F.; SUN, M., “Combining microscale ATR-FTIR and chemometrics to interpret degradation characteristics of earlywood, latewood, and compression wood in water-logged archaeological pine wood”, *Heritage Science*, v. 12, art. 387, 2024. doi: <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01510-z>
- [25] JAKOB, M., JANESCH, J., MÜLLER, U., *et al.*, “Mechanical performance related to chemical variability in differently pretreated and densified birch wood”, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 12, n. 45, pp. 16800–16808, Out. 2021. doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c07642>.
- [26] SALIM, R., ASIK, J., SARJADI, M.S., “Chemical functional groups of extractives, cellulose and lignin extracted from native Leucaena leucocephala bark”, *Wood Science and Technology*, v. 55, n. 2, pp. 295–313, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01258-2>.

- [27] FELDMAN, D., ““Wood—chemistry, ultrastructure, reactions”, by D. Fengel and G. Wegener, Walter de Gruyter, Berlin and New York, 1984, 613 pp. Price: 245 DM.”, *Journal of Polymer Science. Polymer Letters Edition*, v. 23, n. 11, pp. 601–602, 1985. doi: <https://doi.org/10.1002/pol.1985.130231112>.
- [28] POLETO, M., ZATTERA, A.J., FORTE, M.M., *et al.*, “Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size”, *Bioresource Technology*, v. 109, pp. 148–153, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122>. PubMed PMID: 22306076.
- [29] OGEMDI, I., “Combustion of wood by pyrolysis: a review”, *International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 3, n. 1, pp. 1, 2019. doi: <https://doi.org/10.11648/j.ijaos.2019030111>.
- [30] TROJANOVÁ, K., VELKOVÁ, V., KAČÍK, F., “Volatile organic compounds arising from wood polymers on thermal loading of spruce wood”, *Polymers*, v. 17, n. 7, pp. 875–875, 2025. doi: <https://doi.org/10.3390/polym17070875>. PubMed PMID: 40219265.
- [31] GUIDA, M.Y., LANAYA, S., RBIHI, Z., *et al.*, “Thermal degradation behaviors of sawdust wood waste: pyrolysis kinetic and mechanism”, *Journal of Materials and Environmental Sciences*, v. 10, n. 8, pp. 742–755, 2019.
- [32] DIDOMENICO, G., CIOCCOLO, E., BIANCHINI, L., *et al.*, “A systematic review of mechanical pretreatment techniques of wood biomass for bioenergy”, *Energies*, v. 18, n. 13, pp. 3294, 2025. doi: <https://doi.org/10.3390/en18133294>.
- [33] ALBERT, Liew, K.C., “A review on the role of thermogravimetric analysis in assessing thermal stability and degradation of wood”, *Wood Science and Technology*, v. 59, n. 4, pp. 55, 2025. doi: <https://doi.org/10.1007/s00226-025-01665-3>.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7190-1: Projetos de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento*, Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- [35] PFEIL, W., PFEIL, M., *Estruturas de madeira*, 6 ed., Rio de Janeiro, Grupo GEN, 2003.
- [36] DIAS, J.M.S., *Estruturas de madeira*, vol. 3. Salvador, Editora 2B, 2018.
- [37] CASSIANO, C., SOUZA, A.P., STANGERLIN, D.M., *et al.*, “Sazonalidade e estimativas da umidade de equilíbrio de madeiras amazônicas em Sinop, Estado do Mato Grosso”, *Scientia Forestalis*, v. 41, n. 100, pp. 457–468, 2013.
- [38] SILVEIRA, D.P.D.M. “*Avaliação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de cinco espécies da Amazônia*”, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Mato Grosso, Mato Grosso, Cuiabá, 2016.
- [39] ALMEIDA, R.S., COSTA, M.F., PEREIRA, L.A., “Avaliação da densidade e propriedades físicas de madeiras tropicais brasileiras para uso estrutural”, *Wood Science and Technology Advances*, v. 43, pp. 112–125, 2024.
- [40] THYBRING, E.E., FREDRIKSSON, M., ZELINKA, S.L., *et al.*, “Water in wood: a review of current understanding and knowledge gaps”, *Forests*, v. 13, n. 12, pp. 2051, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/f13122051>.
- [41] MOREIRA, L.S., ANDRADE, F.W.C., BALBONI, B.M., *et al.*, “Wood from Forest Residues: Technological Properties and Potential Uses of Branches of Three Species from Brazilian Amazon”, *Sustainability (Basel)*, v. 14, n. 18, pp. 11176, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/su141811176>.
- [42] MEDEIROS, J.T., BARBOSA, C.R., LIMA, F.A., “Relação entre estrutura química e desempenho mecânico de madeiras tropicais por espectroscopia no infravermelho”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 36, n. 2, pp. 214–223, 2024.
- [43] POBEL, D.L., SILVA, R.C., RIBEIRO, A.P.D., *et al.*, “Effect of preheating on the viscosity of composite resins”, *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, v. 27, n. 4, pp. 360–365, 2024. doi: https://doi.org/10.4103/JCDE.JCDE_75_23. PubMed PMID: 38779215.
- [44] CHAVES, Y.S., da Silveira, P.H.P.M., Neuba, L.M., *et al.*, “Evaluation of the density, mechanical, thermal and chemical properties of babassu fibers (*Attalea speciosa*) for potential composite reinforcement”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 23, pp. 2089–2100, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.100>.
- [45] SILVA, M.E.R., Lima, V.S., Nascimento, S.L., *et al.*, “Caracterização física e mecânica de quatro espécies de madeira disponíveis no mercado madeireiro da região de Açailândia-MA e Imperatriz-MA”, *Research, Society and Development*, v. 11, n. 10, pp. e416111032824, 2022. doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32824>.

- [46] GARCIA, R., Calvez, I., Koubaa, A., *et al.*, “Sustainability, circularity, and innovation in wood-based panel manufacturing in the 2020s: Opportunities and challenges”, *Current Forestry Reports*, v. 10, n. 6, pp. 420–441, 2024. doi: <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00229-1>. PubMed PMID: 39464643.
- [47] MENDIS, M.S., ISHANI, P.A.U., HALWATURA, R.U., “Impacts of chemical modification of wood on water absorption: a review”, *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, v. 20, n. 1, pp. 73–88, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s13196-023-00309-y>.