



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RONILDO FARIAS DOS SANTOS**

**ESTUDO INICIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA CARNAÚBA**

**RUSSAS**  
**2020**

RONILDO FARIAS DOS SANTOS

ESTUDO INICIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA CARNAÚBA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante

RUSSAS

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S238e Santos, Ronildo Farias dos Santos.  
Estudo inicial das propriedades mecânicas da Carnaúba / Ronildo Farias dos Santos Santos. – 2020.  
61 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,  
Curso de Engenharia Civil, Russas, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante.
1. Carnaúba. 2. Construção Civil. 3. Ceará. 4. Propriedades Mecânicas. I. Título.

CDD 620

---

RONILDO FARIAS DOS SANTOS

ESTUDO INICIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA CARNAÚBA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Ms. Andriele Nascimento de Souza  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Toda adversidade traz consigo a semente  
de uma vantagem equivalente.

- Napoleon Hill.

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar a Deus, por toda a força e determinação que me concedestes dia após dia, para que eu pudesse concluir esse trabalho e minha graduação.

À minha família e amigos, por todo o apoio e por acreditarem em mim durante toda a minha caminhada.

À minha namorada, que me ajudou bastante durante todos esses anos, sendo minha conselheira, amiga e fonte de inspiração.

Aos meus amigos e companheiros que a universidade me deixou como bem mais valioso e que levarei por toda a vida.

De forma especial, quero agradecer ao meu orientador, Otávio, por acreditar em mim e neste trabalho desde quando ele era apenas uma ideia. Por ter me acompanhado em todo o processo, colocado a mão na massa comigo e por toda a compreensão que demonstrou quanto às nossas limitações. Esse trabalho não existiria hoje se não fosse por você.

À banca avaliadora, por aceitar participar desse momento tão importante da minha formação. Saibam que não foram escolhidos por acaso. Cada um de vocês teve imensurável contribuição no meu processo de formação acadêmica.

Agradeço também a mim mesmo, por me superar a cada dia e dar o meu melhor em tudo o que me proponho a fazer, realizando tudo o que está ao meu alcance. É SÓ O COMEÇO!

## RESUMO

O trabalho consiste na análise de propriedades mecânicas da *Copernicia prunifera*, a partir da caracterização mínima da mesma, com base na ABNT NBR 7190/97. No Ceará, grande parte da madeira utilizada na construção civil é proveniente de outros estados e outras regiões. O objetivo desse estudo é caracterizar a Carnaúba de acordo com suas propriedades, a fim de analisar a viabilidade de utilização da madeira na construção civil, visto que a Carnaúba é encontrada em abundância no estado do Ceará e, mais precisamente, na região do Vale do Jaguaribe, de onde foram retiradas as amostras para a execução dos ensaios. Os experimentos realizados incluem a caracterização da madeira a partir da resistência à compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, densidade básica e densidade aparente. Os parâmetros obtidos dos ensaios sugerem que a Carnaúba se comporta como uma madeira de boa resistência à compressão e baixa densidade, o que se torna um fator favorável à sua utilização em telhados de madeira, devido à leveza e boa trabalhabilidade.

**Palavras-chave:** Carnaúba, Construção Civil, Ceará.

## ABSTRACT

The work consists in the analysis of the mechanical properties of *Copernicia prunifera*, based on its minimum characterization, based on ABNT NBR 7190/97. In Ceará, a large part of the wood used in civil construction comes from other states and other regions. The objective of this study is to characterize Carnaúba according to its properties, in order to analyze the viability of using wood in civil construction, because Carnaúba is found in abundance in the state of Ceará and, more precisely, in the Vale do Jaguaribe region, from where the samples were taken to perform the tests. The experiments performed embraces characterization from compressive strength parallel to fibers, traction parallel to fibers, shearing parallel to fibers, basic and apparent density. The parameters obtained from the tests suggest that Carnaúba behaves as a wood with good resistance to compression and low density, which becomes a favorable factor for its use on wooden roofs, due to its lightness and good workability.

**Keywords:** Carnaúba. Civil Construction. Ceará.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de compressão.....	21
Figura 2.2 – Arranjo de ensaio para compressão paralela às fibras.....	21
Figura 2.3 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.....	23
Figura 2.4 – Arranjo de ensaio para tração paralela às fibras.....	24
Figura 2.5 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento.....	26
Figura 2.6 – Arranjo de ensaio para cisalhamento paralelo às fibras.....	26
Figura 2.7 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de densidade.....	28
Figura 3.1 – Fluxograma de execução do trabalho.....	31
Figura 3.2 – Troncos de Carnaúba utilizados.....	31
Figura 3.3 – Posicionamento original das partes do tronco.....	32
Figura 3.4 – Processamento da madeira.....	33
Figura 3.5, 3.6 e 3.7 – Partes do tronco 1 utilizadas no ensaio de compressão, 24 pedaços de 6 x 4 x 12 cm, 24 pedaços de 4 x 4 x 14 cm, respectivamente.....	34
Figura 3.8, 3.9 e 3.10 – Partes do tronco 2 utilizadas no ensaio de tração, 24 pedaços de 4 x 4 x 35 cm, 24 pedaços torneados de 35 cm de comprimento e 4 cm de diâmetro, respectivamente.....	34
Figura 3.11, 3.12 e 3.13 – Rebaixamento central, resultado do torneamento, corpo de prova defeituoso do Lote L, respectivamente.....	35
Figura 3.14, 3.15 e 3.16 – Partes do tronco 1 utilizadas no ensaio de cisalhamento, 24 pedaços de 7 x 4 x 10 cm, 24 pedaços de 5 x 5 x 6,4 cm com degraus, respectivamente.....	35
Figura 3.17, 3.18 e 3.19 – Representação do corpo de prova durante o ensaio, da rótula de transmissão de carga e do mecanismo de ajuste regulável da base, respectivamente.....	37
Figura 3.20 e 3.21 – Parte do tronco 1 utilizadas no ensaio de densidade, 12 corpos de prova de 2 x 2 x 5 cm, respectivamente.....	37
Figura 3.22 – Ensaio de compressão.....	39
Figura 3.23 – Ensaio de cisalhamento.....	40
Figura 3.24 – Imersão dos corpos de prova em água.....	41
Figura 4.1 – Rompimento do C01.....	43
Figura 4.2 – Flambagem no corpo de prova C21.....	47
Figura 4.3 e 4.4 – Corpos de prova mais resistentes à compressão.....	50

Figura 4.5 – Esmagamento da extremidade do corpo de prova.....	51
Figura 4.6 e 4.7 – Corpos de prova mais resistentes ao cisalhamento.....	56

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Curva tensão x deformação para a compressão.....	22
Gráfico 2.2 – Curva tensão x deformação para a tração.....	25
Gráfico 4.1 – Curvas tensão x deformação dos CPs 01 a 04 sob compressão.....	42
Gráfico 4.2 – Curvas tensão x deformação dos CPs sob compressão do primeiro grupo.....	44
Gráfico 4.3 – Curvas tensão x deformação dos CPs sob compressão do segundo grupo.....	44
Gráfico 4.4 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova não saturados sob compressão.....	45
Gráfico 4.5 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova saturados sob compressão....	46
Gráfico 4.6 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova saturados sob compressão do lote 1D.....	46
Gráfico 4.7 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova não saturados sob compressão... 48	
Gráfico 4.8 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova saturados sob compressão.....	49
Gráfico 4.9 – Curvas tensão x deformação dos CPs 01 a 04 sob cisalhamento.....	52
Gráfico 4.10 – Curvas tensão x deformação dos CPs sob cisalhamento do primeiro grupo....	53
Gráfico 4.11 – Curvas tensão x deformação dos CPs sob cisalhamento do segundo grupo.....	53
Gráfico 4.12 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova não saturados sob cisalhamento.....	54
Gráfico 4.13 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova saturados sob cisalhamento.....	55
Gráfico 4.14 – Densidade básica dos corpos de prova.....	57
Gráfico 4.15 – Densidade aparente dos corpos de prova.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classes de resistência das dicotiledôneas folhosas.....	20
Tabela 4.1 – Resistência a compressão paralela às fibras dos corpos de prova.....	47
Tabela 4.2 – Módulo de Elasticidade.....	49
Tabela 4.3 – Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.....	55
Tabela 4.4 – Parâmetros do ensaio de densidade dos corpos de prova.....	56
Tabela 4.5 – Densidades dos corpos de prova.....	57
Tabela 4.6 – Classes de resistência das dicotiledôneas folhosas.....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_c$	Área da seção transversal comprimida
$A_{t0}$	Área inicial da seção transversal tracionada no trecho central
$A_{v0}$	Área inicial da seção crítica em um plano de fibras
$E_{c0,c}$	Módulo de elasticidade – Compressão
$E_{c0,t}$	Módulo de elasticidade – Tração
$F_{c0,max}$	Máxima força aplicada ao corpo de prova durante o ensaio de compressão
$F_{t0,max}$	Máxima força aplicada ao corpo de prova durante o ensaio de tração
$F_{v0,max}$	Máxima força aplicada ao corpo de prova durante o ensaio de cisalhamento
$V_{12}$	Volume da madeira a 12% de umidade
$V_{sat}$	Volume da madeira saturada
$f_{c0}$	Resistência à compressão paralela às fibras
$f_{t0}$	Resistência à tração paralela às fibras
$f_{v0}$	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$m_{12}$	Massa da madeira a 12% de umidade
$m_s$	Massa seca da madeira
$\varepsilon_{10\%}$	Deformação correspondente à tensão $\sigma_{10\%}$
$\varepsilon_{50\%}$	Deformação correspondente à tensão $\sigma_{50\%}$
$\rho_{ap}$	Densidade aparente
$\rho_{bas}$	Densidade básica
$\sigma_{10\%}$	Tensão de compressão correspondente a 10% da resistência $f_0$
$\sigma_{50\%}$	Tensão de compressão correspondente a 50% da resistência $f_0$

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1	<b>Problema</b> .....	17
1.2	<b>Justificativa</b> .....	18
1.3	<b>Objetivos</b> .....	18
1.3.1	<i>Objetivo geral</i> .....	18
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	18
1.4	<b>Organização do trabalho</b> .....	19
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	20
2.1	<b>Ensaio de caracterização</b> .....	20
2.1.1	<i>Resistência à compressão paralela às fibras</i> .....	20
2.1.2	<i>Resistência à tração paralela às fibras</i> .....	23
2.1.3	<i>Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras</i> .....	25
2.1.4	<i>Densidade</i> .....	27
2.2	<b>Madeira como material</b> .....	28
2.3	<b>Tipos de madeira usuais no Brasil</b> .....	29
2.3.1	<i>Maçaranduba</i> .....	29
2.3.2	<i>Muiracatiara</i> .....	29
2.3.3	<i>Eucalipto</i> .....	30
2.4	<b>A Carnaúba</b> .....	30
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	31
3.1	<b>Considerações iniciais</b> .....	31
3.2	<b>Aquisição da madeira</b> .....	31
3.3	<b>Divisão em lotes</b> .....	32
3.4	<b>Tratamento da madeira</b> .....	32
3.5	<b>Moldagem de corpos de prova</b> .....	33
3.5.1	<i>CP – Compressão paralela às fibras</i> .....	33
3.5.2	<i>CP – Tração paralela às fibras</i> .....	34
3.5.3	<i>CP – Cisalhamento paralelo às fibras</i> .....	35
3.5.4	<i>CP – Densidade básica e aparente</i> .....	37
3.6	<b>Ensaio de caracterização</b> .....	38
3.6.1	<i>Compressão paralela às fibras</i> .....	38
3.6.2	<i>Tração paralela às fibras</i> .....	39

3.6.3	<i>Cisalhamento paralelo às fibras</i> .....	39
3.6.4	<i>Densidade básica e aparente</i> .....	40
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	42
4.1	<b>Compressão paralela às fibras</b> .....	42
4.1.1	<i>Tensão x Deformação</i> .....	42
4.1.2	<i>Módulo de elasticidade</i> .....	48
4.2	<b>Tração paralela às fibras</b> .....	50
4.3	<b>Cisalhamento paralelo às fibras</b> .....	51
4.3.1	<i>Tensão x Deformação</i> .....	51
4.3.2	<i>Resistência máxima</i> .....	55
4.4	<b>Densidade</b> .....	56
4.5	<b>Classificação</b> .....	58
4.6	<b>Resumo</b> .....	59
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	60
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61

## 1 INTRODUÇÃO

Com o advento da urbanização, ocorreu um grande impulso no uso de matéria prima para construção, o que provocou a necessidade de utilização de novos materiais para atender à demanda apresentada na criação e expansão de inúmeras cidades. Mais tarde, com o efeito da globalização, ocorreu o avanço dos sistemas de transporte, dando origem a obras de infraestrutura que fariam a conexão entre cidades e estados, o que intensificou ainda mais os trabalhos na indústria da construção civil e, por consequência, a procura por insumos.

A chegada de grandes centros urbanos, despertou o interesse de grande parte da população brasileira, que vivia na zona rural e passou a migrar para as cidades em busca de emprego, acesso à educação e saúde e condições de vida mais prósperas. Logo, o setor da construção civil passou por grandes e importantes transformações em aspectos econômicos, financeiros, tecnológicos e de consumo. Tudo isso impulsionou abruptamente o número de obras para residências unifamiliares, dando início à ascensão do mercado imobiliário e intensificando ainda mais o êxodo rural que almejava, também, a obtenção de trabalhos na construção civil, que iria precisar de muita mão de obra para suprir a demanda apresentada pelo crescimento das cidades.

Para que uma construção se concretize, as etapas de concepção, projeto, orçamento, obra e manutenção, devem ser planejadas e executadas em função dos materiais constituintes. Portanto, é de extrema importância conhecê-los, para que se faça o uso adequado dos mesmos e se viabilize soluções mais sofisticadas para a construção civil. (RIBEIRO et al, 2002).

Nesse cenário, é conveniente falar sobre o salto de produção e comercialização da madeira - um dos materiais mais importantes em obras, desde a fase de locação até a execução de elementos para sustentação de telhados (na maioria dos casos). Nesse ponto, é importante considerar que a grande maioria das construções habitacionais contam com telhados sustentados por tramas de madeira.

A madeira é usada, na construção civil, de forma temporária, durante as etapas iniciais, ou de forma permanente, introduzida nas fases de acabamento. Para o setor madeireiro, a construção civil tem grande importância no segmento de produtos acabados, como esquadrias, pisos e estruturas de telhados, facilmente encontradas no mercado. No Brasil, a madeira com maior volume de produção e comercialização é a serrada. (MAURO, 2013).

Dentre os tipos de madeira serrada, no Brasil, é comum encontrar madeiras como eucalipto, muiracatiara, maçaranduba, ipê, entre outras, utilizadas de forma estrutural para telhados, como esquadrias e para a construção de elementos necessários ao canteiro de obras,

desde a fase de locação para demarcação do terreno. Diferente do Brasil, em países como Estados Unidos e alguns na Europa, é mais comum o uso de painéis de madeira compensada.

Devido à grande facilidade de obtenção e adaptação para fins determinados, a madeira sempre teve papel importante na história da construção, sendo matéria prima essencial. Por conta disso, esse insumo evoluiu ao longo das civilizações, desde o uso primitivo até a adesão de estruturas com características mais complexas. (MANFRINATO, 2015).

Logo, o uso da madeira na construção civil tem evoluído cada vez mais, estando presente em diversas formas, além das que já foram mencionadas anteriormente. Um exemplo disso é a utilização em pisos e assoalhos, decoração interna e em exteriores. Obviamente, cada uma dessas categorias requer o uso de uma madeira específica que se adeque melhor ao esforço mecânico, abrasão, isolamento térmico, exposição às intempéries, entre outros.

## **1.1 Problema**

Como era de se imaginar, o fomento da exploração, extração e processamento da madeira trouxe consigo a escassez de algumas espécies da mesma nas regiões onde ocorriam essas atividades. Por conta disso, surgiu a necessidade de se obter o insumo trazendo-o de outros lugares. No entanto, esse é um processo que incorre custos e riscos adicionais, principalmente com transporte, além da alta variabilidade e baixa rastreabilidade do material.

O deslocamento da madeira dos locais de extração até os centros de consumo, também conhecido como transporte florestal, equivale a cerca de 50% do custo do material para a fábrica. Esse número varia, ainda, em função da eficiência do carregamento e descarregamento, distância, condições da malha viária, existência de frete, quantidade de madeira a ser transportada, disponibilidade e custo do combustível. (RIBEIRO, 2013).

Atualmente, há produção e comercialização de madeira tratada em todo o Brasil. Porém, a prática de adquirir o material proveniente de outras regiões ainda é bastante comum, o que acarreta o baixo aproveitamento dos recursos naturais próprios de cada lugar. Isso provoca, em parte, um grande desperdício, uma vez que a utilização de matéria prima local aumentaria o fluxo comercial na região, além de possibilitar aos proprietários de madeireiras e serrarias um melhor custo benefício na aquisição dos insumos necessários à produção.

## 1.2 Justificativa

Com base nisso, torna-se conveniente o estudo detalhado das espécies de madeira pertencentes a cada estado ou região, de forma que se possa determinar as propriedades físicas e biológicas de cada uma delas. Fazendo isso, é possível encontrar madeiras de alta qualidade que irão beneficiar a população, atendendo melhor às suas demandas, concomitante ao aquecimento do comércio local e melhoria nos processos logísticos, em aspectos geográficos.

No estado do Ceará não é diferente. Mais precisamente na região do Vale do Jaguaribe (RVJ), há grande abundância da madeira Carnaúba, ainda não explorada e nem utilizada comercialmente. A madeira comercializada nessa região tem origem de outros estados, o que demanda tempo, custo e qualidade inferior.

É nessa perspectiva que o presente trabalho traz uma abordagem mais profunda sobre a madeira carnaúba - uma espécie bastante conhecida no nordeste brasileiro, utilizada de forma primitiva há décadas, principalmente por camponeses. Suas conhecidas propriedades de resistência mecânica, resistência à agentes biológicos e durabilidade, fazem com que a carnaubeira (outra denominação da palmeira) esteja no topo das madeiras mais bem qualificadas para fazer parte do cenário da construção civil brasileira.

## 1.3 Objetivos

### *1.3.1 Objetivo geral*

O objetivo é avaliar, conforme os dados obtidos, a viabilidade de aproveitamento da madeira como matéria prima na indústria da construção civil da cidade de Russas e em toda a região do Vale do Jaguaribe, no estado do Ceará.

### *1.3.2 Objetivos específicos*

- Determinar as seguintes propriedades da Carnaúba:
  - Resistência à compressão paralela às fibras;
  - Resistência à tração paralela às fibras;
  - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;
  - Densidade básica e aparente.

- Avaliar os resultados obtidos a partir dos ensaios em laboratório;
- Comparar as propriedades encontradas da Carnaúba com as madeiras mais utilizadas atualmente.

#### **1.4 Organização do trabalho**

Esse trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos principais. São eles a Introdução, o Referencial Teórico, os Materiais e Métodos, os Resultados e as Discussões e, por último, as Considerações Finais.

O Capítulo 1 aborda a introdução, onde o tema é discutido de forma resumida. Além disso, as justificativas, os objetivos gerais e específicos do trabalho são apresentados.

No Capítulo 2 é apresentado os conhecimentos teóricos necessários para a realização desse trabalho. Os temas abordados nesse capítulo são os parâmetros mecânicos e físicos da madeira, a densidade e a resistência a compressão, a tração e ao cisalhamento.

O Capítulo 3 expõe a metodologia utilizada para a confecção deste trabalho, dividida nas etapas de preparo dos ensaios e aborda os procedimentos utilizados para obtenção dos resultados.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais e a discussão desses. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais acerca do trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Ensaios de caracterização

Neste tópico, são apresentados os procedimentos de ensaio realizados para a determinação das propriedades de resistência da madeira em estudo. A caracterização consiste em ensaios destrutivos de compressão, tração e cisalhamento, no sentido paralelo às fibras, e o ensaio não destrutivo para avaliação da densidade básica e aparente. Os processos abordados estão de acordo com as recomendações normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR 7190/1997, anexo B).

As plantas que possuem semente e frutos são chamadas de angiospermas e todas as angiospermas que produzem madeira são classificadas como dicotiledôneas folhosas. Sabendo que a carnaúba se encaixa nessas características, pode-se constatar que ela faz parte desse grupo e, portanto, sua classe de resistência será definida de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 2.1 – Classes de resistência das dicotiledôneas folhosas

Dicotiledôneas					
(Valores na condição-padrão de referência U = 12%)					
Classes	$f_{c0k}$ (MPa)	$f_{yk}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{aparente}$ (kg/m <sup>3</sup> )
C 20	20	4	9500	500	650
C 30	30	5	14500	650	800
C 40	40	6	19500	750	950
C 60	60	8	24500	800	1000

Fonte: NBR 7190 (1997)

#### 2.1.1 Resistência à compressão paralela às fibras

A resistência é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal quadrada, de acordo com a equação:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A_c} \quad (2.1)$$

Em que:

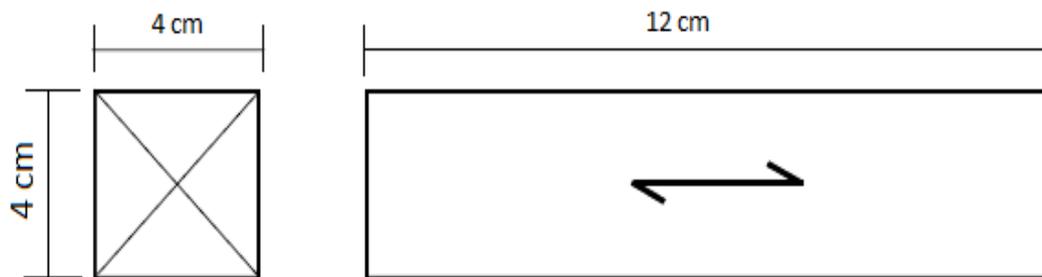
$F_{c0,max}$  é a máxima força aplicada ao corpo de prova durante o ensaio;

$A_c$  é a área da seção transversal comprimida;

$f_{c0}$  é a resistência à compressão paralela às fibras.

Para a caracterização da resistência à compressão paralela às fibras de um dado lote, a NBR 7190/1997 permite empregar corpos de prova com seção transversal quadrada de lado mínimo igual a 1,8 cm e comprimento igual a três vezes o lado da seção transversal, ensaiando-se 12 corpos de prova, obtidos de 12 peças delgadas (Figura 2.1).

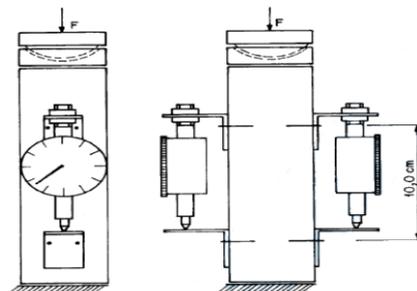
Figura 2.1 – Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de compressão



Fonte: NBR 7190 (1997)

A determinação do módulo de elasticidade exige medidas de deformações em pelo menos duas faces opostas do corpo de prova, onde podem ser utilizados relógios comparadores fixados ao mesmo, distantes de 10 cm, com precisão de 0,001 mm, fixados por duas cantoneiras metálicas pregadas ao corpo de prova (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Arranjo de ensaio para compressão paralela às fibras



Fonte: NBR 7190 (1997)

De início, deve ser utilizado um corpo de prova de referência, no qual é executado o carregamento até a ruptura, a fim de estimar a resistência aproximada da amostra. Nos demais corpos de prova, a resistência deve ser determinada a partir de carregamento monotônico crescente, com taxa de aplicação de carga em torno de 10 MPa/min.

O módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva “tensão x deformação”, que é definida pelos pontos  $(\sigma_{10\%}, \varepsilon_{10\%})$  e  $(\sigma_{50\%}, \varepsilon_{50\%})$ , que correspondem, respectivamente, a 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras, medida no ensaio. Logo, o valor é dado pela seguinte equação:

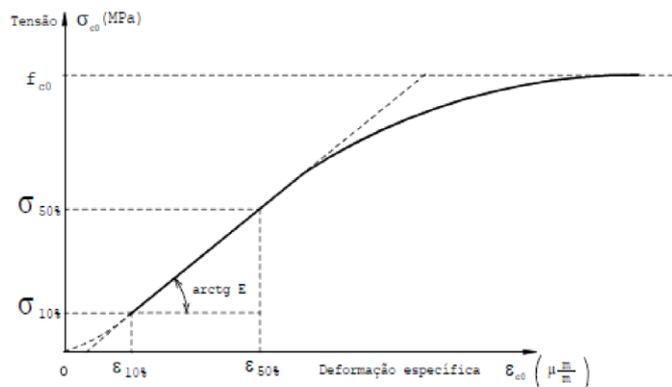
$$E_{c0,c} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (2.2)$$

Em que:

$\sigma_{10\%}$  e  $\sigma_{50\%}$  são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência  $f_{c0}$ ;

$\varepsilon_{10\%}$  e  $\varepsilon_{50\%}$  são as deformações específicas medidas no corpo de prova, correspondentes às tensões  $\sigma_{10\%}$  e  $\sigma_{50\%}$ .

Gráfico 2.1 – Curva tensão x deformação para a compressão



Fonte: NBR 7190 (1997)

Para efeitos de caracterização mínima, devem ser utilizadas duas amostras, sendo uma com corpos de prova saturados e a outra com corpos de prova em umidade ambiente.

### 2.1.2 Resistência à tração paralela às fibras

A resistência é dada pela máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo de prova alongado com trecho central de seção transversal reduzida, onde as extremidades são mais resistentes, a fim de que a ruptura ocorra no centro. A resistência é dada pela seguinte equação:

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,max}}{A_{t0}} \quad (2.3)$$

Em que:

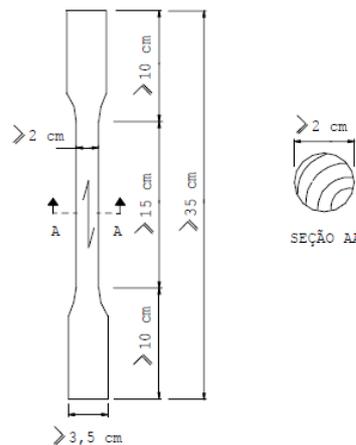
$F_{t0,max}$  é a máxima força aplicada ao corpo de prova durante o ensaio;

$A_t$  é a área inicial da seção transversal tracionada do trecho central;

$f_{t0}$  é a resistência à tração paralela às fibras.

Para a caracterização da resistência à tração paralela às fibras de um dado lote, a NBR 7190/1997 permite empregar corpos de prova com seção transversal circular, sendo duas extremidades com diâmetro maior ou igual a 35 mm e o trecho central com diâmetro maior ou igual a 20mm, ensaiando-se 12 corpos de prova, obtidos de 12 peças delgadas (Figura 2.3).

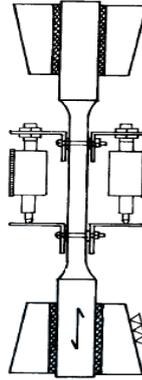
Figura 2.3 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração



Fonte: NBR 7190 (1997)

A determinação do módulo de elasticidade exige medidas de deformações em pelo menos duas posições diametralmente opostas, onde podem ser utilizados relógios comparadores com precisão de 0,001 mm fixados ao mesmo (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Arranjo de ensaio para tração paralela às fibras



Fonte: NBR 7190 (1997)

De início, deve ser utilizado um corpo de prova de referência, onde é executado o carregamento até a ruptura, a fim de estimar a resistência aproximada da amostra. Nos demais corpos de prova, a resistência deve ser determinada a partir de carregamento monotônico crescente, com taxa de aplicação de carga torno de 10 MPa/min.

O módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação, que é definida pelos pontos  $(\sigma_{10\%}, \epsilon_{10\%})$  e  $(\sigma_{50\%}, \epsilon_{50\%})$ , que correspondem, respectivamente, a 10% e 50% da resistência à tração paralela às fibras, medida no ensaio. Logo, o valor é dado pela seguinte equação:

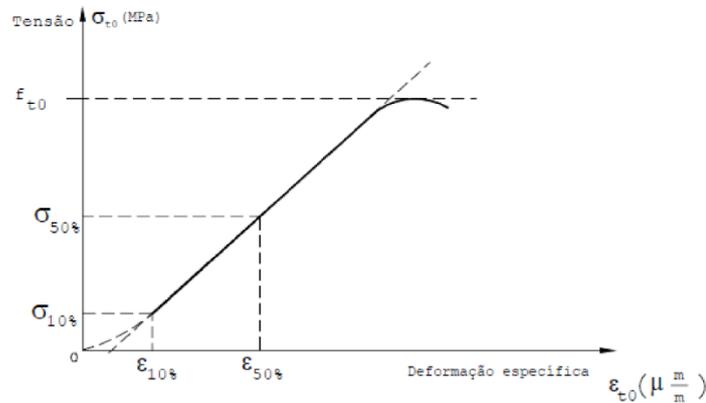
$$E_{c0,t} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (2.4)$$

Em que:

$\sigma_{10\%}$  e  $\sigma_{50\%}$  são as tensões de tração correspondentes a 10% e 50% da resistência  $f_t$ ;

$\epsilon_{10\%}$  e  $\epsilon_{50\%}$  são as deformações específicas medidas no corpo de prova, correspondentes às tensões  $\sigma_{10\%}$  e  $\sigma_{50\%}$ .

Gráfico 2.2 – Curva tensão x deformação para a tração



Fonte: NBR 7190 (1997)

Para efeitos de caracterização mínima, devem ser utilizadas duas amostras, sendo uma com corpos de prova saturados e a outra com corpos de prova em umidade ambiente.

### 2.1.3 Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

A resistência é dada pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo de prova prismático, de acordo com a equação:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (2.5)$$

Em que:

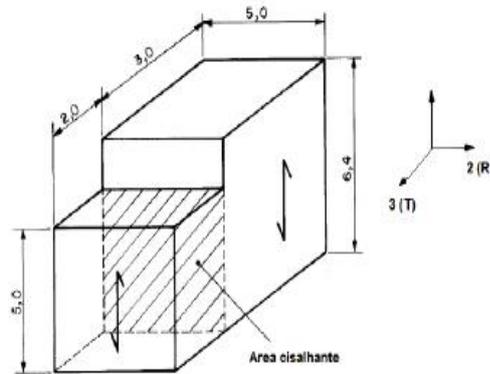
$F_{v0,max}$  é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova durante o ensaio;

$A_{v0}$  é a área inicial da seção crítica em um plano de fibras;

$f_{v0}$  é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Para a caracterização da resistência ao cisalhamento de um determinado lote de madeira, a NBR 7190/1997 estabelece que o corpo de prova deve ser fabricado com o plano da seção crítica paralelo à direção radial das fibras da madeira, ensaiando-se 12 corpos de prova, obtidos de 12 peças delgadas (Figura 2.5).

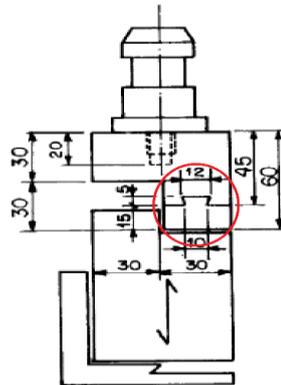
Figura 2.5 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento



Fonte: NBR 7190 (1997)

Para o ajuste do corpo de prova ao equipamento de ensaio, deve ser utilizada uma rótula, que fará a transmissão de carga, para que a tensão atuante seja direcionada exclusivamente para a seção crítica em forma de cisalhamento (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Arranjo de ensaio para cisalhamento paralelo às fibras



Fonte: NBR 7190 (1997)

De início, deve ser utilizado um corpo de prova de referência, no qual é executado o carregamento até a ruptura, a fim de estimar a resistência aproximada da amostra. Nos demais corpos de prova, a resistência deve ser determinada a partir de carregamento monotônico crescente, com taxa de aplicação de carga em torno de 2,5 MPa/min.

Para efeitos de caracterização mínima, devem ser utilizadas duas amostras, sendo uma com corpos de prova saturados e a outra com corpos de prova em umidade ambiente.

### 2.1.4 Densidade

A NBR 7190/1997 define *densidade básica* como uma massa específica convencional, obtida pela razão entre a massa seca e o volume saturado de um dado corpo, sendo calculada pela seguinte equação:

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (2.6)$$

Em que:

$m_s$  é a massa seca da madeira, em quilogramas;

$V_{sat}$  é o volume da madeira saturada, em metros cúbicos, que é determinado pelas dimensões finais do corpo de prova submerso em água, até que atinja massa constante ou com variação máxima de 0,5% em relação à medida anterior.

A NBR 7190/1997 define *densidade aparente* como uma massa específica convencional, obtida pela razão entre a massa e o volume de corpos de prova com teor de umidade de 12%, sendo calculada pela seguinte equação:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (2.7)$$

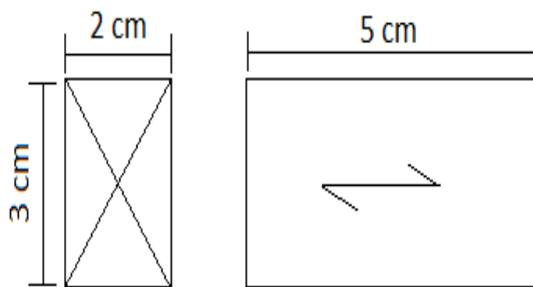
Em que:

$m_{12}$  é a massa da madeira a 12% de umidade, em quilogramas;

$V_{12}$  é o volume da madeira a 12% de umidade, em metros cúbicos.

Os corpos de prova devem ter forma prismática com seção transversal retangular de 2,0 cm x 3,0 cm e 5,0 cm de comprimento ao longo das fibras.

Figura 2.7 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de densidade



Fonte: NBR 7190 (1997)

Para a determinação do volume saturado devem ser aferidas as medidas dos lados da seção transversal e do comprimento, tomando mais de uma medida para levar em consideração as imperfeições devidas ao inchamento do corpo de prova. O procedimento de ensaio consiste em três etapas, que são:

- 1) Determinar a massa seca ( $m_s$ ) do corpo de prova, com exatidão de 0,01g;
- 2) Determinar o volume saturado por meio das medidas dos lados da seção transversal e comprimento, com precisão de 0,1 mm;
- 3) Medir a massa e o volume do corpo de prova com teor de umidade a 12%.

De posse dos valores de  $m_s$ ,  $m_{12}$ ,  $V_{sat}$  e  $V_{12}$ , pode-se determinar a densidade básica e aparente, a partir das equações (2.6) e (2.7).

## 2.2 Madeira como material

A madeira está presente na vida humana desde o início, tendo sido fundamental no desenvolvimento das civilizações, com papel importante, devido a sua resistência e versatilidade. Sendo o primeiro material de construção utilizado, influenciou o estudo de outros materiais que acabaram colocando-a em segundo plano. No entanto, com o avanço da tecnologia a madeira se mostrou novamente um material atrativo à construção civil. (JUNIOR, SILVA & SOARES, 2017).

Os elementos utilizados nas estruturas de madeira podem ser retirados diretamente do tronco das árvores, como também através de processos a fim de obter-se produtos derivados. Esses produtos podem ser do tipo seções estruturais de madeira, como a madeira lamelada colada, ou também do tipo placas, como os aglomerados de madeira e contraplacados. (ALMEIDA, 2012).

No Brasil, a grande maioria das coberturas de residências unifamiliares são

constituídas de elementos de madeira. (JUNIOR & CESAR, 2010) subdivide a cobertura em quatro partes principais: o telhado, composto por vários tipos de telhas; a trama, que sustenta o telhado; treliça ou tesoura, que sustenta a trama e; o sistema de contraventamento que permite à estrutura resistir às ações horizontais. As três últimas são constituídas de elementos de madeira.

### **2.3 Tipos de madeira usuais no Brasil**

A seguir serão abordados alguns dos principais tipos de madeira comercializados e utilizados em coberturas na construção civil no Brasil.

#### **2.3.1 *Maçaranduba***

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a maçaranduba é uma madeira largamente utilizada no nordeste brasileiro, no setor da construção civil, principalmente para a confecção de ripas, caibros e tesouras para tramas em telhados, sendo comumente vendida em madeireiras e armazéns. Mas também pode ser utilizada em outros segmentos, como o da construção pesada, servindo para a fabricação de dormentes ferroviários.

Barbosa (2014) define a maçaranduba como um material de elevada resistência mecânica e de pouca plasticidade, de difícil secagem ao ar, devendo optar-se por estufas; de baixa permeabilidade; alta durabilidade e resistência ao ataque de fungos e cupins. Segundo o autor, a trabalhabilidade da maçaranduba permite um bom acabamento, sendo fácil de lixar e torneiar, no entanto, é moderadamente difícil de aplainar.

#### **2.3.2 *Muiracatiara***

Também conhecida como Aroeira, é uma madeira pesada, considerada uma das mais resistentes contra cupins e apodrecimento. É bastante utilizada em construções externas, como vigamentos de pontes, estacas e dormentes, sendo também utilizada na construção civil em tesouras, vigas, caibros, ripas e outras peças. Além disso, é comum estar presente em esquadrias e alguns elementos decorativos. (HUSQVARNA, 2016).

A muiracatiara é uma madeira de alta durabilidade, não sendo atacada por insetos ou cupins, apresentando também baixa permeabilidade. Além disso, é um material de fácil trabalhabilidade, que permite excelente acabamento, recebendo bem pinturas e vernizes. Em contrapartida, apresenta problemas de empenamento e rachaduras na secagem ao ar, devendo-

se ter os devidos cuidados na secagem artificial, para que não ocorram rachaduras profundas e endurecimento artificial. (IPT, 2013).

### **2.3.3 Eucalipto**

Segundo o IPT, o eucalipto é considerado como madeira de reflorestamento e tem maior ocorrência nas regiões centro-oeste, sudeste e sul do Brasil, tendo sua principal comercialização na construção civil na fabricação de elementos de cobertura, como vigas e caibros e, também, bastante utilizada para a produção de elementos de esquadrias, móveis e cabos de ferramentas.

É uma madeira de baixa durabilidade natural, susceptível à ação de cupins e xilófagos marinhos, porém, resistente ao apodrecimento. Tem alta trabalhabilidade, apresentando boas características de aplainamento, lixamento, perfuração e acabamento, no entanto, requer o uso de técnicas apropriadas para minimizar os efeitos de tensões. Em geral, são difíceis de secar, onde a secagem deve ser feita em estufa. (IPT, 2020).

### **2.4 A Carnaúba**

A carnaúba (*Copernicia prunifera*), também conhecida como carnaubeira ou carnaíba, é uma palmeira da família Arecaceae, com presença predominante na região nordeste do Brasil. Essa espécie tem grande importância ambiental, social e econômica, podendo ser utilizada de diversas formas, dentre elas, a extração da cera e aproveitamento das folhas para o artesanato. (COSTA, 2015).

A carnaubeira é símbolo do estado do Ceará e, geralmente, encontra-se em margens de rios, solos aluvionais e argilosos, sendo capaz de suportar grandes períodos de estiagem. A grande relevância da árvore para o estado é explicada pelo fato de que sua exploração, por muito tempo, tem sido fonte de renda para muitas famílias cearenses. Além disso, a madeira tem uso na construção civil, já que é macia e de fácil manuseio e, por conta disso, é facilmente encontrada em construções no Ceará. (MESQUITA, 2011).

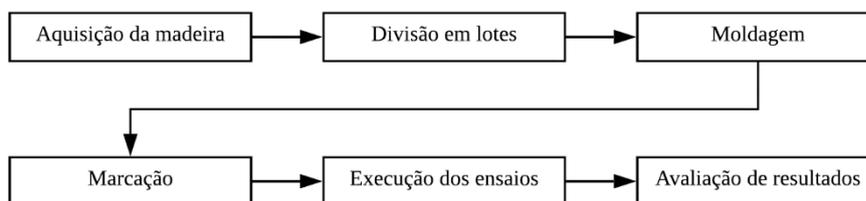
De acordo com D'alva (2004), a planta possui inúmeras utilidades, entre suas partes. Segundo o autor, o tronco da carnaúba é utilizado há bastante tempo na construção civil e marcenaria, devido seu formato reto e a boa durabilidade, apresentando boa resistência ao cupim e outros insetos. Além disso, ele afirma que a madeira é de boa resistência quando mantida seca ou imersa em água salgada.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Considerações iniciais

A metodologia utilizada nesse estudo teve como embasamento inicial a revisão da literatura acerca do assunto em análise. De posse da revisão bibliográfica, prosseguiu-se com o desenvolvimento prático do trabalho, a partir da aquisição de material, divisão em lotes, extração da casca da madeira para formação de tarugos e, finalmente a moldagem dos corpos de prova para cada um dos ensaios propostos anteriormente, como indicado no fluxograma da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma de execução do trabalho



Fonte: Autor

#### 3.2 Aquisição da madeira

A figura 3.2. apresenta o material utilizado na pesquisa foi doado pela Cerâmica Bezerra, situada no município de Russas – CE. Em quantidade, foram obtidos dois troncos de Carnaúba, com idade de aproximadamente 2 (dois) anos, medindo 3,3 m e 4,6 m de comprimento (já considerado o valor de descarte de 30 cm nas extremidades, requerido pela ABNT NBR 7190/97).

Figura 3.2 – Troncos de Carnaúba utilizados



Fonte: Autor

### 3.3 Divisão em lotes

O primeiro tronco, medindo 4,5 m de comprimento e 12 cm de diâmetro (desconsiderando a casca), foi utilizado para a moldagem dos corpos de prova referentes aos ensaios de compressão e cisalhamento. Dessa divisão, resultaram 4 lotes de 43 cm (1A a 1D - compressão), 4 lotes de 40 cm (1E a 1H – cisalhamento).

O segundo tronco, medindo 4,6 m de comprimento e 14 cm de diâmetro (desconsiderando a casca), foi utilizado para a moldagem dos corpos de prova referentes ao ensaio de tração paralela às fibras e densidade. Dessa divisão, resultaram 12 lotes de 35 cm (2A a 2L – tração) e um 1 lote de 30 cm (2M – densidade).

Após a serragem dos troncos, foi feito o processo de rastreabilidade. Esse procedimento consistiu em identificar o posicionamento de cada pedaço no tronco original, atribuindo um lote para cada um deles, de forma a obter maior detalhamento dos dados encontrados após os ensaios, o que permite encontrar padrões e avaliar de forma mais precisa as propriedades da madeira em estudo, a partir de parâmetros como diâmetro, cor, aspectos das fibras, entre outros, como mostra a figura 3.3.

Figura 3.3 – Posicionamento original das partes do tronco



Fonte: Autor

### 3.4 Tratamento da madeira

De posse do material segmentado em lotes menores, foi feito o processo de tratamento da carnaúba, onde foi retirada a casca da madeira, ocorrendo a transformação da seção transversal que, de início, era circular e passou a ser retangular. O procedimento foi realizado em uma marcenaria situada na cidade de Russas – CE, como mostra a figura 3.4.

Figura 3.4 – Processamento da madeira



Fonte: Autor

### **3.5 Moldagem de corpos de prova**

#### ***3.5.1 CP – Compressão paralela às fibras***

Os corpos de prova para o ensaio de compressão foram obtidos a partir de 04 lotes retirados do tronco 01 (Figura 3.5), medindo cada um deles 43 cm de comprimento e 12 cm de lado, desconsiderando a espessura da casca (parte mais escura da seção transversal).

Cada um desses 04 lotes foi dividido em 3 pedaços menores (12 no total), de aproximadamente 14 cm cada, onde foram moldados 2 corpos de prova por pedaço de 14 cm x 12 cm, resultando em 24 peças. (Figura 3.6).

Por fim, de posse dos 24 tarugos de 6 cm x 14 cm, foi realizado o procedimento final para o acabamento, até chegar nas dimensões finais pretendidas para cada corpo de prova, medindo 4 cm x 4cm x 12 cm, obedecendo a exigência da norma de que o comprimento deve ser no mínimo 3 vezes maior do que o lado da seção transversal quadrada. (Figura 3.7).

Figura 3.5, 3.6 e 3.7 – Partes do tronco 1 utilizadas no ensaio de compressão, 24 pedaços de 6 x 4 x 12 cm, 24 pedaços de 4 x 4 x 14 cm, respectivamente



Fonte: Autor

### 3.5.2 CP – Tração paralela às fibras

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram obtidos através de 06 lotes retirados do tronco 02 (Figura 3.8), medindo cada um deles 35 cm de comprimento e 14 cm de diâmetro, desconsiderando a espessura da casca (parte mais escura da seção transversal).

Cada um desses 06 lotes foi dividido em 4 pedaços na seção transversal (24 no total), de aproximadamente 4 cm de lado por 35 cm de comprimento (Figura 3.9). Posteriormente, foi realizado o processo de torneamento, para transformar a seção transversal que estava quadrada e passou a ser circular (Figura 3.10).

Figura 3.8, 3.9 e 3.10 – Partes do tronco 2 utilizadas no ensaio de tração, 24 pedaços de 4 x 4 x 35 cm, 24 pedaços torneados de 35 cm de comprimento e 4 cm de diâmetro, respectivamente



Fonte: Autor

Em seguida, as peças circulares passaram novamente pelo processo de moldagem no torno mecânico (Figura 3.11), a fim de reduzir o diâmetro de 4 cm para 3,5 cm, como sugere a norma. Além disso, foi realizado o rebaixamento nos 15 cm centrais da peça, até alcançar o

diâmetro ideal de 2,5 cm, previamente definido e que se enquadra nos padrões exigidos pela NBR 7190/97. O resultado final pode ser observado abaixo na Figura 3.12.

No decorrer da etapa de torneamento, um dos corpos de prova acabou sendo danificado durante o processo de rotação. O rompimento teve como causa uma fissura interna na peça, previamente imperceptível, que veio à tona apenas após ser submetida ao torno mecânico. O corpo de prova defeituoso pode ser observado na Figura 3.13.

Figura 3.11, 3.12 e 3.13 – Rebaixamento central, resultado do torneamento, corpo de prova defeituoso do Lote L, respectivamente



Fonte: Autor

### 3.5.3 CP – Cisalhamento paralelo às fibras

Os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento foram obtidos a partir de 6 lotes retirados do tronco 01 (Figura 3.14), medindo cada um deles 40 cm de comprimento e 12 cm de lado, desconsiderando a espessura da casca (parte mais escura da seção transversal).

Cada um desses 6 lotes foi dividido em 4 pedaços menores (24 no total), de aproximadamente 10 cm de comprimento cada, onde foi moldado 1 corpo de prova por peça de 7,0 cm x 10,0 cm (Figura 3.15).

De posse das 24 peças, foi realizado o procedimento para o acabamento, até chegar nas dimensões externas pretendidas para cada corpo de prova: 5,0 cm x 6,4 cm x 5,0 cm. Logo em seguida, retirou-se uma seção de 2,0 cm x 1,5 cm de forma a se obter um “degrau”, onde deve ser encaixada uma peça metálica para direcionar o esforço de compressão para a seção crítica, provocando assim o cisalhamento entre as superfícies (Figura 3.16)

Figura 3.14, 3.15 e 3.16 – Partes do tronco 1 utilizadas no ensaio de cisalhamento, 24 pedaços de 7 x 4 x 10 cm, 24 pedaços de 5 x 5 x 6,4 cm com degraus, respectivamente



Fonte: Autor

No entanto, notou-se de imediato um problema relacionado ao isolamento do corpo de prova na máquina de ensaio, pois, como mostra a Figura 3.17, para que ocorra o cisalhamento, a seção crítica deve estar suspensa, criando um vão abaixo da mesma. Com isso, a aplicação do esforço faria com que a peça viesse a desenvolver uma rotação. Portanto, foi realizado o processo de soldagem de duas chapas metálicas em formato de L, como mostra a Figura 3.18.

Como pode-se observar também na Figura 3.18, foi confeccionada uma peça metálica de formato retangular, com seção de 2,5 cm x 5,0 cm, para atuar como uma rótula de transmissão de carga da máquina de ensaio para a seção crítica onde deve ocorrer o cisalhamento, como exige o procedimento de ensaio descrito na NBR 7190/97.

Ainda assim, para certificar-se de que o isolamento do corpo de prova fosse 100% eficaz, adicionou-se um mecanismo de ajuste regulável da base, de forma que, além do movimento de rotação fosse garantido que não houvesse afastamento lateral (Figura 3.19).

Tais ajustes foram pensados e executados visando a realização do ensaio de forma mais segura e precisa, garantindo a máxima exatidão dos resultados pois, uma vez que o corpo de prova fosse isolado por completo, todo o esforço atuante fosse direcionado para a seção crítica, evitando esforços de compressão que pudessem distorcer o resultado final encontrado.

Figura 3.17, 3.18 e 3.19 – Representação do corpo de prova durante o ensaio, da rótula de transmissão de carga e do mecanismo de ajuste regulável da base, respectivamente



Fonte: Autor

### 3.5.4 CP – Densidade básica e aparente

Os corpos de prova para o ensaio de densidade foram obtidos a partir de 1 lote retirado do tronco 01 (Figura 3.20), medindo 35 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro, desconsiderando a espessura da casca (parte mais escura da seção transversal).

A partir desse lote, foram moldadas as amostras para o ensaio de densidade, como prevê a norma, resultando em 12 corpos de prova com as dimensões: 2,0 cm x 3,0 cm x 5,0 cm (Figura 3.21).

Figura 3.20 e 3.21 – Parte do tronco 1 utilizadas no ensaio de densidade, 12 corpos de prova de 2 x 2 x 5 cm, respectivamente



Fonte: Autor

### 3.6 Ensaio de caracterização

Os ensaios de ruptura foram realizados no laboratório de mecânica da Universidade Federal do Ceará – Campus de Russas, com o devido auxílio técnico. O ensaio de densidade foi realizado no laboratório de Química, no mesmo campus, também com o devido acompanhamento técnico.

De início foi realizada a aferição dos equipamentos e revisão dos procedimentos de ensaio. Em seguida, um corpo de prova de cada tipo (para ensaios de rompimento) foi utilizado como base para estimativa da resistência da amostra e da velocidade a ser utilizada em cada ensaio, a fim de alcançar máxima exatidão nos resultados.

#### 3.6.1 *Compressão paralela às fibras*

Realizou-se, novamente, a marcação de metade da amostra (12 corpos de prova) com pincel permanente, a fim de garantir que a mesma não se apagasse em decorrência do contato com a água, referente ao critério de saturação. Esta parte da amostra destinada à saturação foi mantida em condição de submersão por um período de 14 horas.

Deu-se, então, início ao rompimento dos corpos de prova da amostra não saturada. No primeiro momento, foi definida uma velocidade estimada para o ensaio de 2 mm/min. Notou-se que a taxa de aumento da tensão foi superior ao recomendado por norma, de 10 MPa por minuto. Então, para o segundo corpo de prova, foi definida a velocidade de 1 mm/min. Ainda assim foi desempenhada uma taxa de aplicação de tensão maior do que o ideal. Finalmente, para o terceiro corpo de prova, foi utilizada a velocidade de 0,6 mm/min, que promoveu a taxa desejada, tendo sido esta, portanto, a velocidade adotada para os demais corpos de prova nesse ensaio.

Figura 3.22 – Ensaio de compressão



Fonte: Autor

Após o período de submersão, foi realizado o mesmo procedimento com os corpos de prova em estado de saturação, também com a velocidade de 0,6 mm/min.

### ***3.6.2 Tração paralela às fibras***

Similar ao ensaio de compressão, foi mantida uma condição de submersão durante 14 horas para metade das amostras, ou seja, 12 corpos de prova, previamente marcados com lápis permanente, a fim de manter essa marcação.

Foi então realizado o primeiro ensaio com uma amostra de referência para determinação da velocidade ideal, assim como ocorreu com as amostras de compressão e de cisalhamento. No entanto, o resultado do ensaio não saiu como o esperado. Novamente foi realizado o teste com um segundo corpo de prova e, novamente, notou-se irregularidade no experimento. Por conta disso, este ensaio foi abortado, restando 21 dos 24 corpos de prova, considerando que um deles se rompeu durante o processo de usinagem e os outros dois foram danificados durante a tentativa de ensaio.

### ***3.6.3 Cisalhamento paralelo às fibras***

Da mesma forma que o ensaio de compressão, foi feita a marcação de metade das amostras (12 corpos de prova) com pincel permanente, a fim de garantir que a mesma não se apagasse em decorrência do contato com a água, referente ao critério de saturação. Esta parte da amostra destinada à saturação foi mantida em condição de submersão por um período de 14

horas.

Deu-se, então, início ao rompimento dos corpos de prova da amostra não saturada. Para o corpo de prova de referência, foi definida a velocidade de 0,6 mm/min, tomando como base o ensaio de compressão. No entanto, notou-se que a taxa de aumento da tensão foi inferior ao valor recomendado por norma, de 2,5 MPa por minuto. Então, para o segundo corpo de prova, foi definida a velocidade de 0,8 mm/min, que se aproximou da taxa desejada, fazendo com que essa velocidade fosse adotada para os demais corpos de prova nesse ensaio. O arranjo utilizado pode ser observado na figura 3.23.

Figura 3.23 – Ensaio de cisalhamento



Fonte: Autor

Após o período de submersão, foi realizado o mesmo procedimento com os corpos de prova em estado de saturação, utilizando, também, a velocidade de 0,8 mm/min.

#### ***3.6.4 Densidade básica e aparente***

De início foi feita a marcação dos 12 corpos de prova, para permitir o controle sobre a variação nas aferições. Assim como a norma recomenda, os corpos de prova foram colocados em estufa a 100° C, realizando-se aferições em períodos de 6 horas.

Como os corpos de prova são consideravelmente pequenos, já na segunda aferição foi alcançado o resultado esperado para a massa seca. A NBR 7190 sugere que a massa seca pode ser encontrada quando a diferença entre duas aferições seguidas for inferior a 0,5%.

De posse do valor de  $M_s$  (massa seca), foi calculado o valor ideal para  $M_{12}$  (massa a 12% de umidade). Até então, a umidade dos corpos de prova estava em torno de 10,6%,

portanto, foi necessário deixar que a umidade ambiente aumentasse, realizando-se aferições constantes até que o valor fosse o mais próximo de 12%. Em seguida, foram realizadas as medições dos corpos de prova para obter o valor de  $V_{12}$  (volume a 12% de umidade).

Em seguida, os corpos de prova foram imersos em recipiente com água até alcançar a condição de saturação, como mostra a Figura 3.24. Posteriormente foram medidas as dimensões, a fim de determinar o  $V_{sat}$  (volume de saturação).

Figura 3.24 – Imersão dos corpos de prova em água



Fonte: Autor

De posse de todos esses valores, foi feita a aplicação nas equações mencionadas no tópico 2.1.4 para obter os valores de densidade básica e aparente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos nos ensaios de laboratório foram inseridos e processados no software Excel que, em média, resultaram em mais de 800 parâmetros de tempo, deformação e força para cada um dos 24 corpos de prova de compressão e de cisalhamento.

No entanto, para a densidade o processo foi mais simples. Os 12 corpos de prova forneceram 108 parâmetros divididos em massa inicial, massa seca 1 (6 horas de estufa), massa seca 2 (12 horas de estufa) e as dimensões do corpo de prova quando seco e quando saturado a 12% de umidade, a fim de se calcular o volume saturado.

Para os ensaios de ruptura, foi definido, por conta própria, como critério de parada o decaimento de 25% da força resistente máxima ou quando a deformação atingisse a marca de 4 mm, com base nos valores de deformação alcançados nas amostras de referência. Já para os ensaios de densidade básica e aparente, seguiu-se o critério de parada estabelecido pela norma, que sugere a condição de massa seca quando o resultado entre duas aferições subsequentes apresentarem uma diferença menor do que 0,5%.

### 4.1 Compressão paralela às fibras

#### 4.1.1 Tensão x Deformação

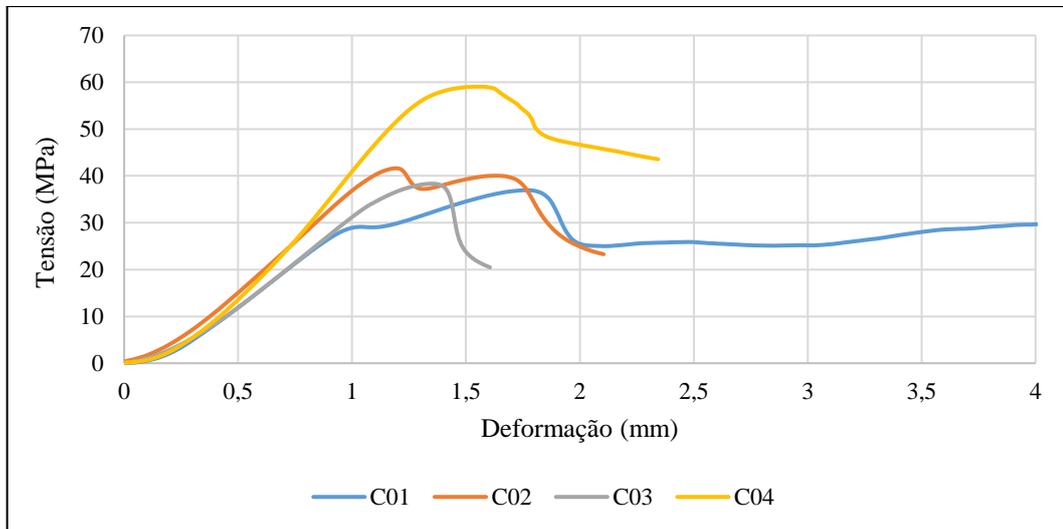
O material de ensaio foi dividido em dois tipos de amostras, conforme indica a ABNT NBR 7190, sendo 12 unidades em umidade ambiente e 12 unidades em condição de saturação. Dessa forma, os corpos de prova enumerados do 1 ao 12 foram ensaiados em condição natural e os corpos de prova enumerados do 13 ao 24 foram ensaiados em condição de saturação, após submersos em água durante 14 horas.

De início, foi realizado o primeiro ensaio com o primeiro corpo de prova, utilizando um valor de velocidade estimado para determinar a resistência aproximada, que serviu de base para o rompimento dos demais corpos de prova, como sugere a ABNT NBR 7190.

No Gráfico 4.1 é possível perceber que a curva de tensão x deformação para o corpo de prova C01, referente à primeira amostra do ensaio de compressão, apresenta uma deformação superior às outras três amostras. Isso pode ser explicado pelo procedimento de adaptação e ajuste dos parâmetros determinados no software para o ensaio, o que ocasionou um

maior tempo de aplicação de carga até encontrar a condição ideal para a execução do ensaio.

Gráfico 4.1 – Curvas tensão x deformação dos CPs 01 a 04 sob compressão



Fonte: Autor

O estado final do corpo de prova C01 pode ser visto logo abaixo, na Figura 4.1.

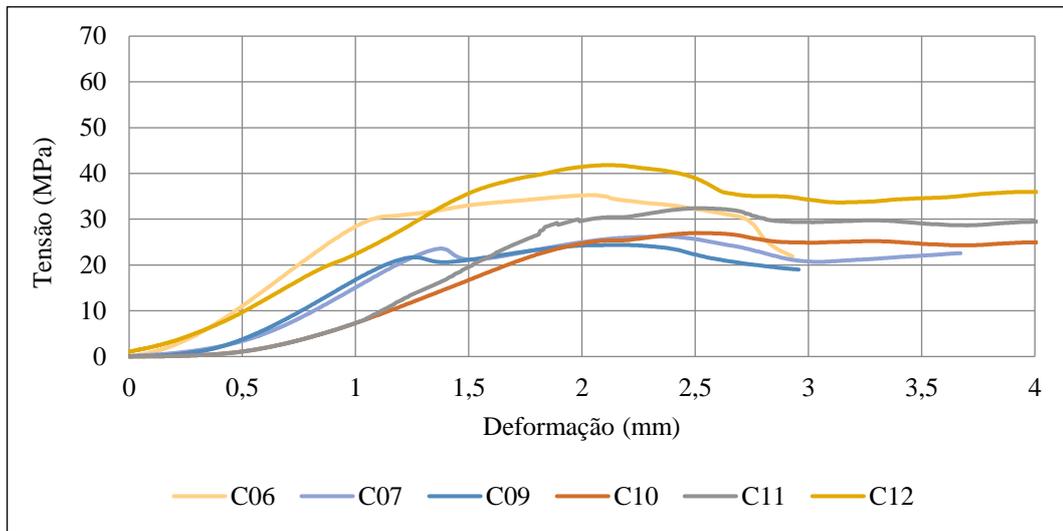
Figura 4.1 – Rompimento do C01



Fonte: Autor

A seguir, pode-se observar dois gráficos, representando dois grupos de amostras, separados pelo comportamento da curva tensão x deformação. No Gráfico 4.2, é possível notar que os corpos de prova de identificação C06, C07, C09, C10, C11 e C12 apresentaram um crescimento mais gradual, sofrendo maiores deformações e, na maior parte do tempo, com tensões variando entre 20 e 30 MPa.

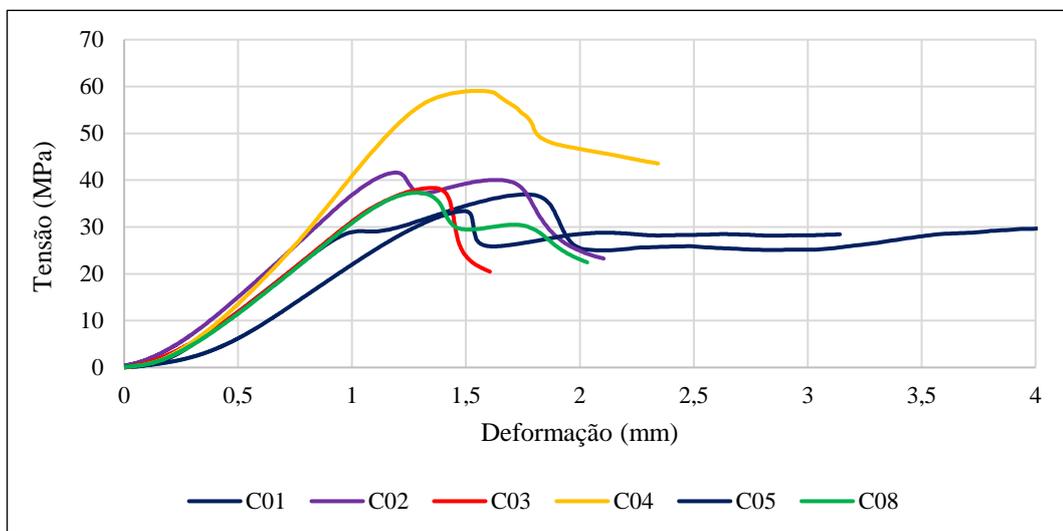
Gráfico 4.2 – Curvas tensão x deformação dos CPs sob compressão do primeiro grupo



Fonte: Autor

Já no Gráfico 4.3, tem-se o segundo grupo de amostras, onde é possível perceber que os corpos de prova de identificação C01, C02, C03, C04, C05 e C08 alcançaram maiores tensões, e também maiores oscilações, e que a maioria deles teve considerável queda de tensão antes de chegar aos 2 mm de deformação, ao contrário do que aconteceu no grupo de amostras do gráfico anterior. Desse grupo, apenas o C08 não fazia parte do lote 1A, originalmente localizado na extremidade inferior do Tronco 01.

Gráfico 4.3 – Curvas tensão x deformação dos CPs sob compressão do segundo grupo



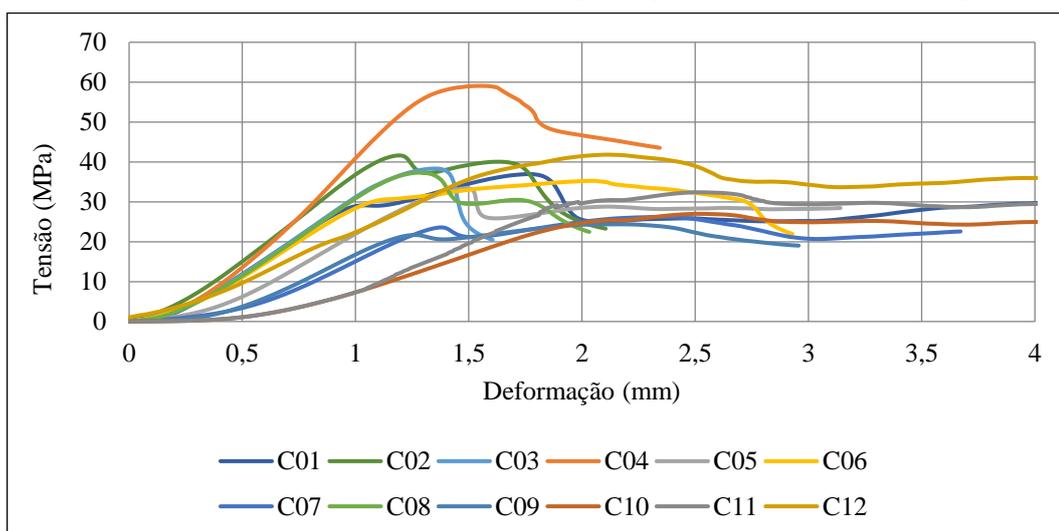
Fonte: Autor

A representação gráfica da curva tensão x deformação está disposta logo abaixo, no Gráfico 4.4 com as curvas referentes aos corpos de prova em condição não saturada. Observa-se que a primeira metade do gráfico (até 2 mm de deformação) apresenta maiores oscilações de tensão. Isso acontece porque, no início da aplicação de carga, a tensão atuante varia bastante até que se alcance a acomodação ideal para o ensaio.

O corpo de prova C04 obteve o melhor desempenho em termos de resistência, chegando a 59 MPa no ponto de máxima aplicação de carga e pouco mais de 2 mm de deformação. Uma possível tendência para explicar tal destaque será apresentada mais à frente.

Os demais corpos de prova obtiveram comportamentos semelhantes, com tensão de resistência à compressão variando entre 22 e 42 MPa e, em média, 35 MPa.

Gráfico 4.4 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova não saturados sob compressão



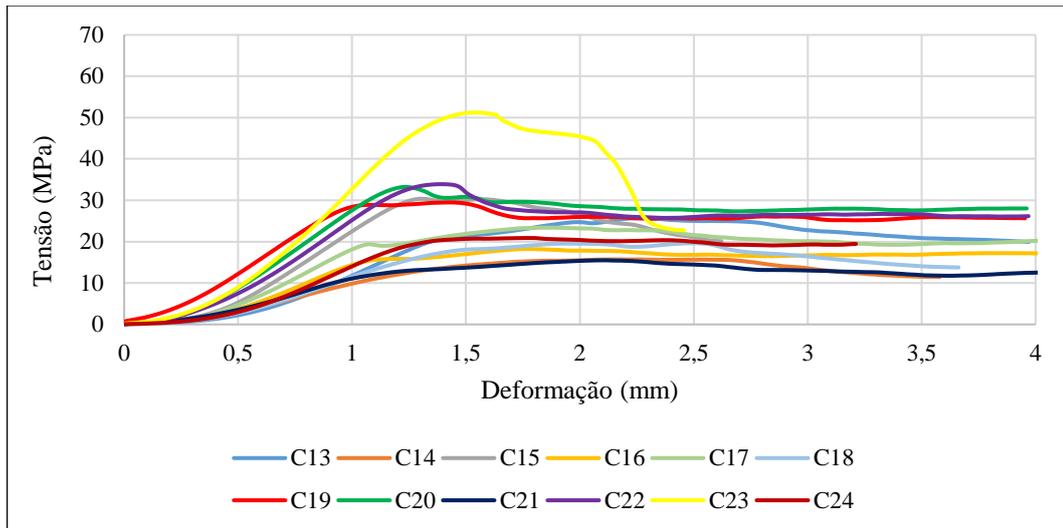
Fonte: Autor

Para os corpos de prova em condição de saturação, pode-se observar um comportamento mais alinhado em quase todas as amostras como mostrado no Gráfico 4.5, configurando uma determinada proporção em termos de tensão e também deformação. Além disso, notou-se que a curva apresentada se mostrou bem mais suave e constante, em relação aos não saturados que, em várias amostras, foi observada a ocorrência de oscilações, caracterizando variação de tensão.

Observou-se também uma redução no valor de tensão máxima resistente, quando comparadas as curvas de tensão x deformação destes com os as curvas referentes aos corpos de prova em condição de umidade ambiente.

O corpo de prova C23, assim como o C04 da amostra não saturada, obteve desempenho em fator de destaque comparado aos demais corpos de prova da mesma amostra. O mesmo obteve uma resistência de compressão máxima de 51 MPa. O restante das amostras obteve tensões resistentes variando entre 15 e 34 MPa e, em média, 24 MPa.

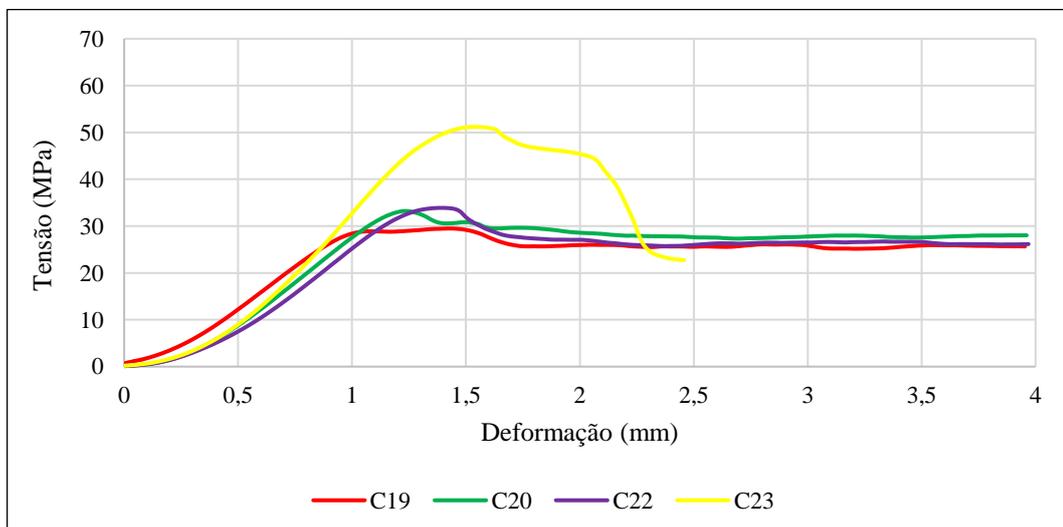
Gráfico 4.5 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova saturados sob compressão



Fonte: Autor

É interessante observar que os corpos de prova C19, C20, C22 e C23 alcançaram maior valor de tensão e estão todos inclusos no lote 1D, estando este posicionado originalmente na região central do Tronco 01. O Gráfico 4.6 mostra, de maneira isolada, essas amostras que obtiveram melhor desempenho em relação ao comportamento da curva.

Gráfico 4.6 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova saturados sob compressão do lote 1D



Fonte: Autor

O corpo de prova C21 apresentou um desempenho inferior aos demais do mesmo lote. A amostra após o rompimento pode ser vista na Figura 4.2, onde é possível observar um pequeno fenômeno de flambagem possivelmente causado por falta de exatidão nas medidas durante a usinagem, que provocou tensão concentrada ao invés de distribuída.

Figura 4.2 – Flambagem no corpo de prova C21



Fonte: Autor

Os valores obtidos para a resistência à compressão paralela às fibras dos 24 corpos de prova ensaiados podem ser observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resistência a compressão paralela às fibras dos corpos de prova

Não Saturados		Saturados	
N	$f_{c0}$ (MPa)	N	$f_{c0}$ (MPa)
<b>C09</b>	22	<b>C21</b>	15
<b>C07</b>	24	<b>C14</b>	16
<b>C10</b>	25	<b>C16</b>	18
<b>C01</b>	29	<b>C17</b>	19
<b>C11</b>	32	<b>C18</b>	20
<b>C05</b>	33	<b>C24</b>	21
<b>C06</b>	35	<b>C13</b>	26
<b>C08</b>	37	<b>C19</b>	29
<b>C03</b>	38	<b>C15</b>	30
<b>C02</b>	42	<b>C20</b>	33
<b>C12</b>	42	<b>C22</b>	34
<b>C04</b>	59	<b>C23</b>	51
<b>Média</b>	32	<b>Média</b>	24

Fonte: Autor

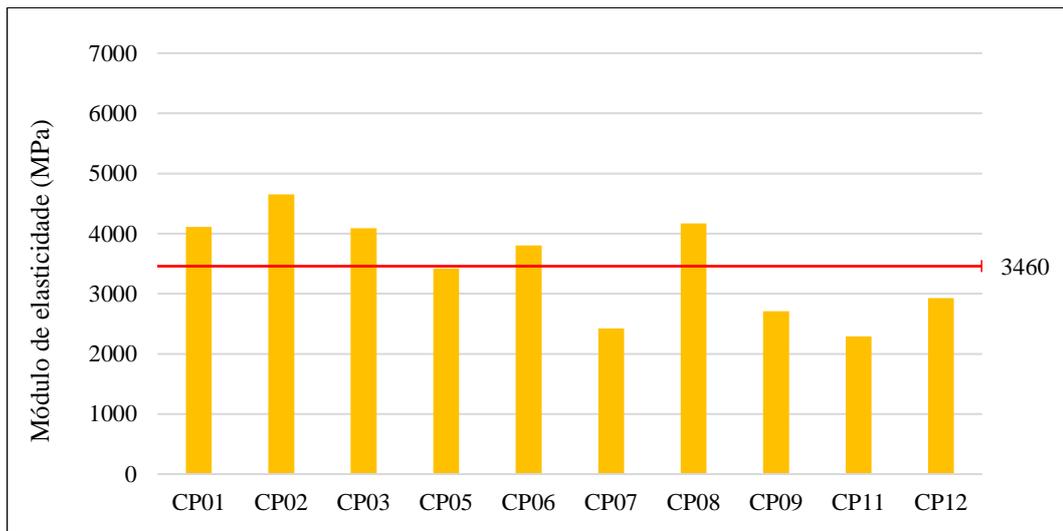
#### 4.1.2 Módulo de elasticidade

De posse dos valores de tensão e deformação para cada ponto de aplicação de força, foi calculado o módulo de elasticidade, como prevê a norma, a partir da Equação 2.2.

Considerando que o módulo de elasticidade é inversamente proporcional à taxa de deformação, percebeu-se que alguns corpos de prova que apresentaram determinadas posições na ordem de tensão resistente obtiveram outras posições quando considerada a elasticidade. Por exemplo, na amostra não saturada, a menor tensão resistente encontrada foi a do C09, de 22 MPa. Já no módulo de elasticidade, o menor valor encontrado foi para o C10, de 1908 MPa.

No geral, os valores variaram entre 1908 e 5691 MPa e média de 3517 Mpa. No entanto, como critério de otimização, foram descartados os valores extremos e o resultado pode ser observado no Gráfico 4.7.

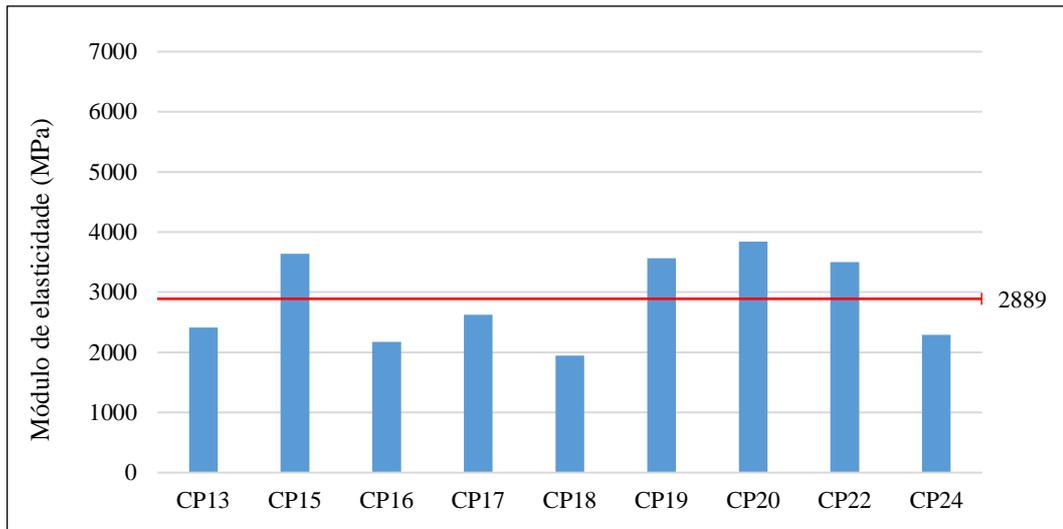
Gráfico 4.7 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova não saturados sob compressão



Fonte: Autor

Já para a amostra saturada, assim como a tensão resistente, o módulo de elasticidade também foi inferior, variando entre 1498 e 4969 MPa e média de 2837 Mpa. Novamente, foram descartados os valores extremos e calculada uma nova média, como mostra o Gráfico 4.8.

Gráfico 4.8 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova saturados sob compressão



Fonte: Autor

Os valores obtidos para a resistência à compressão paralela às fibras dos 24 corpos de prova ensaiados podem ser observados na Tabela 4.2, onde os dados em vermelho indicam os valores que foram descartados para o cálculo da média, por serem extremos.

Tabela 4.2 – Módulo de Elasticidade

Não Saturados		Saturados	
N	$E_{c0,c}$ (MPa)	N	$E_{c0,c}$ (MPa)
<b>C10</b>	1908	<b>C14</b>	1498
<b>C11</b>	2290	<b>C21</b>	1583
<b>C07</b>	2424	<b>C18</b>	1944
<b>C09</b>	2709	<b>C16</b>	2173
<b>C12</b>	2929	<b>C24</b>	2290
<b>C05</b>	3418	<b>C13</b>	2414
<b>C06</b>	3805	<b>C17</b>	2626
<b>C03</b>	4089	<b>C22</b>	3503
<b>C01</b>	4111	<b>C19</b>	3566
<b>C08</b>	4171	<b>C15</b>	3638
<b>C02</b>	4653	<b>C20</b>	3843
<b>C04</b>	5691	<b>C23</b>	4969
<b>Média</b>	3460	<b>Média</b>	2889

Fonte: Autor

- Tendência observada:

Notou-se uma certa relação entre a resistência do corpo de prova e a coloração do mesmo. Foi observado que os corpos de prova mais escuros obtiveram maiores resistências e menores deformações. A coloração escura está atribuída ao fato de que a amostra foi retirada de uma posição próxima à casca da carnaúba, onde as fibras aparecem em maior número e tornam o material mais resistente.

Os corpos de prova C04 e C23, que obtiveram destaque em relação aos outros, se enquadram perfeitamente nessa tendência, como pode ser visto nas Figuras 4.3 e 4.4:

Figura 4.3 e 4.4 – Corpos de prova mais resistentes à compressão



Fonte: Autor

## 4.2 Tração paralela às fibras

O ensaio de tração paralela às fibras com o corpo de prova de carnaúba não pôde ser realizado nessa ocasião. Foram realizados testes com dois corpos de prova, mas não saiu como o esperado. A deformação ocorreu nas extremidades e não na seção central do corpo de prova.

Foi percebido o esmagamento das regiões extremas das amostras, devido ao esforço inicial realizado pelo equipamento para promover a acomodação e fixação do mesmo no corpo de prova. No entanto, essa carga tornou-se um problema quando direcionada perpendicularmente às fibras, o que danificou o material de forma contínua e impossibilitou a execução do ensaio. O mesmo aconteceu com o segundo corpo de prova testado. Este esmagamento pode ser observado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Esmagamento da extremidade do corpo de prova



Fonte: Autor

### **4.3 Cisalhamento paralelo às fibras**

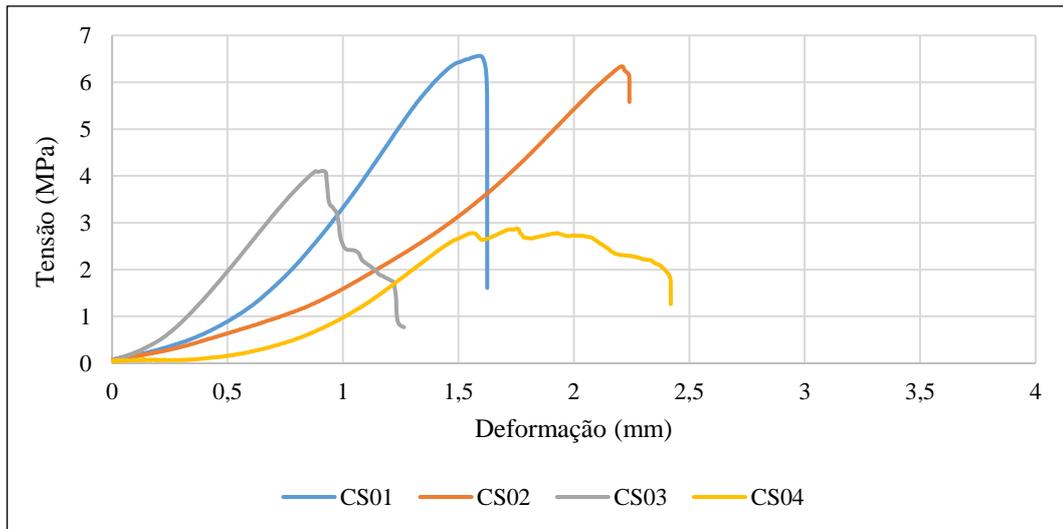
#### ***4.3.1 Tensão x Deformação***

De início, foi realizado o primeiro ensaio com o primeiro corpo de prova, utilizando um valor de velocidade estimado para determinar a resistência aproximada, que serviu de base para o rompimento dos demais corpos de prova, como sugere a ABNT NBR 7190.

Da mesma forma como se deu no ensaio de compressão, uma amostra de 12 corpos de prova foi submetida à condição de saturação. A nomenclatura também seguiu o padrão, sendo de CS01 a CS12 a amostra não saturada e de CS13 a CS24 a amostra saturada.

No Gráfico 4.9 é possível perceber que a curva de tensão x deformação para os corpos de prova CS01, CS02, CS03 e CS04, referentes à primeira amostra do ensaio de cisalhamento, apresentam curvas pouco similares entre si. Isso pode ser explicado pelo procedimento de adaptação e ajuste dos parâmetros determinados no software para o ensaio, o que ocasionou tal disparidade na aplicação de carga até encontrar a condição ideal para a execução do ensaio.

Gráfico 4.9 – Curvas tensão x deformação dos CPs 01 a 04 sob cisalhamento



Fonte: Autor

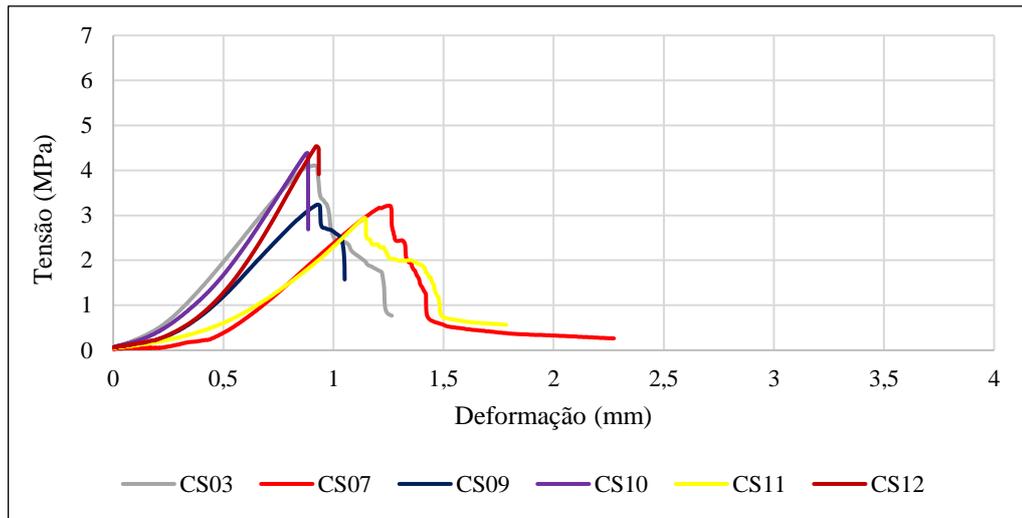
Quanto ao restante dos corpos de prova do ensaio de cisalhamento, para a condição de umidade natural, foi notado um comportamento mais uniforme na curva tensão x deformação.

No geral, as amostras obtiveram valores de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras variando entre 2,8 e 4,5 MPa e média de 4,2 MPa, tendo como destaque os corpos de prova de identificação CS01 e CS02 que alcançaram 6,6 e 6,3 MPa, respectivamente.

Percebeu-se também que as deformações foram bem inferiores aos valores encontrados no ensaio de resistência à compressão paralela às fibras, o que caracteriza uma ruptura direta.

Abaixo, pode-se separar as curvas de comportamento dos corpos de prova em 03 grupos, de acordo com a variação da deformação. No primeiro grupo (Gráfico 4.10), é notável que os corpos de prova de identificação CS03, CS07, CS09, CS10, CS11 e CS12 chegaram ao máximo de tensão e sofreram ruptura antes de chegar aos 1,5 mm de deformação.

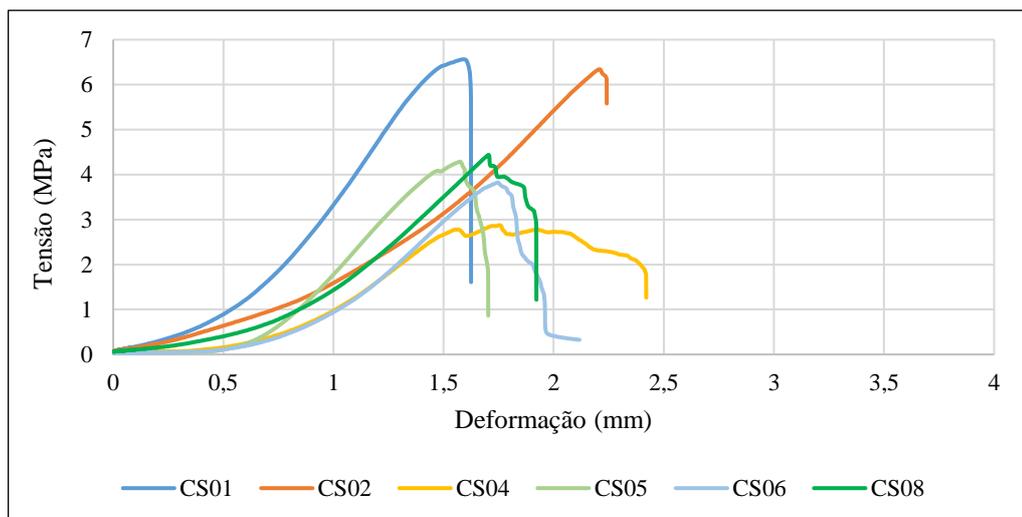
Gráfico 4.10 – Curvas tensão x deformação dos CPs sob cisalhamento do primeiro grupo



Fonte: Autor

No Gráfico 4.11, temos um segundo grupo de corpos de prova, CS01, CS02, CS04, CS05, CS06 e CS08, onde as amostras alcançaram o limite máximo de tensão e sofreram ruptura após atingir a marca de 1,5 mm de deformação e antes do valor de 2,5 mm. Desses, apenas o CS08 não foi retirado do lote 1E que, originalmente, estava localizado na região central do Tronco 01. Novamente, assim como observado no ensaio de compressão para amostras saturadas, encontra-se maior desempenho da carnaúba na região central do tronco da madeira.

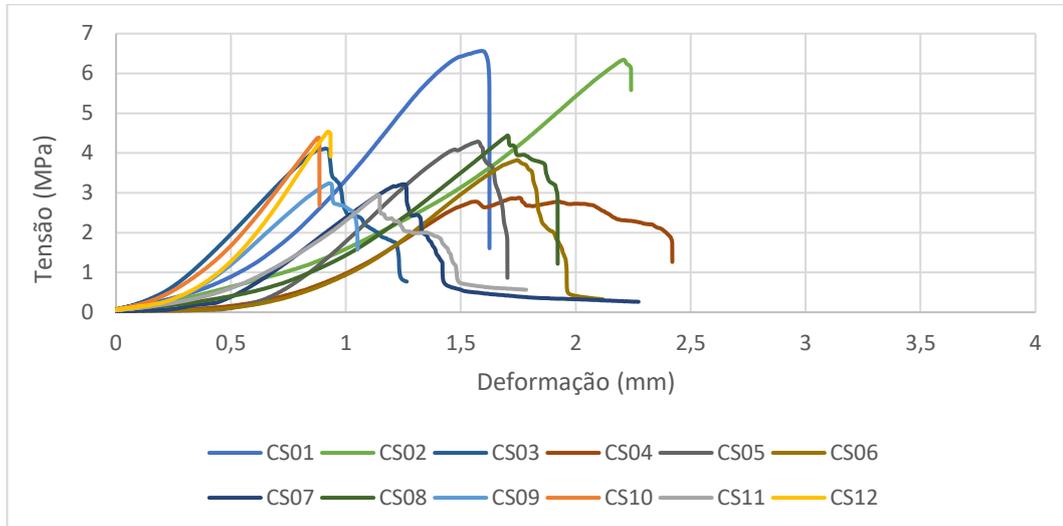
Gráfico 4.11 – Curvas tensão x deformação dos CPs sob cisalhamento do segundo grupo



Fonte: Autor

No gráfico 4.12 podem ser observados o grupo de amostras não saturadas.

Gráfico 4.12 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova não saturados sob cisalhamento

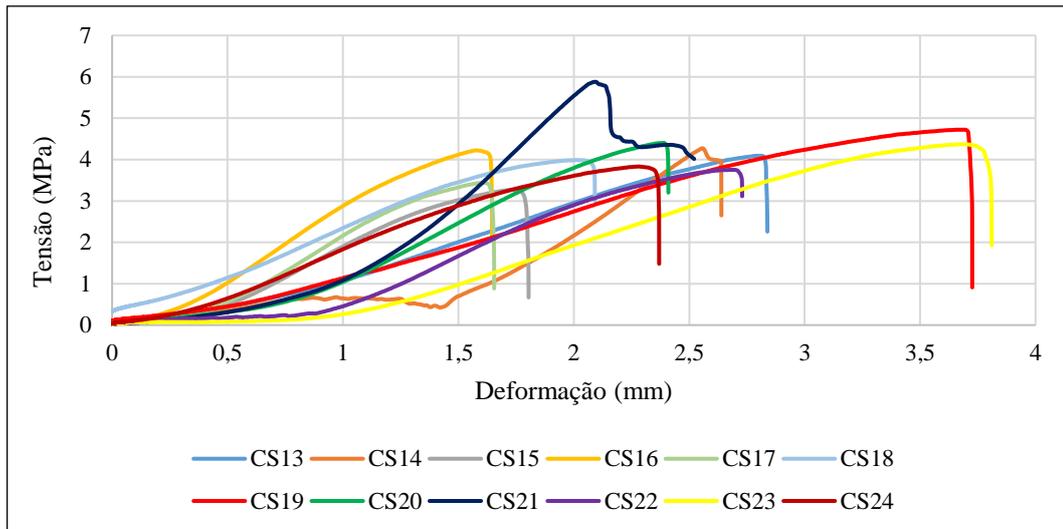


Fonte: Autor

Para os corpos de prova em condição de saturação, pode-se observar um comportamento diferente, quanto à taxa de deformação que, em algumas amostras, foi bem superior aos valores obtidos no mesmo ensaio realizado com as amostras não saturadas.

Quanto aos valores de tensão máxima de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, não houve divergências expressivas. Em geral, os valores variaram entre 3,3 e 4,7 MPa, com destaque para o CS21 que alcançou a marca de 5,9 MPa. No entanto, é interessante observar que os valores mínimos encontrados nas amostras saturadas foram superiores aos valores mínimos encontrados nas amostras não saturadas. Ou seja, mesmo que a média tenha sido a mesma, foi possível notar resultados mais padronizados no ensaio com as amostras saturadas. As curvas de tensão x deformação podem ser observadas no Gráfico 4.13.

Gráfico 4.13 – Curvas tensão x deformação dos corpos de prova saturados sob cisalhamento



Fonte: Autor

#### 4.3.2 Resistência máxima

Os valores obtidos para cada um dos corpos de prova do ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras podem ser vistos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

Não Saturados		Saturados	
N	$f_{v0}$ (MPa)	N	$f_{v0}$ (MPa)
CS01	6,6	CS13	4,1
CS02	6,3	CS14	4,3
CS03	4,1	CS15	3,3
CS04	2,8	CS16	4,2
CS05	4,1	CS17	3,4
CS06	3,8	CS18	4,0
CS07	3,2	CS19	4,7
CS08	4,4	CS20	4,4
CS09	3,2	CS21	5,9
CS10	4,4	CS22	3,8
CS11	2,9	CS23	4,4
CS12	4,5	CS24	3,8
<b>Média</b>	<b>4,2</b>	<b>Média</b>	<b>4,2</b>

Fonte: Autor

- Tendência observada:

Novamente foi observada a tendência de valores máximos de resistência associados

à coloração escura da amostra ensaiada. Neste caso, o destaque ocorreu no ensaio das amostras CS 01 e CS02, onde pode-se constatar a coloração escura nas Figuras 4.6 e 4.7.

Figura 4.6 e 4.7 – Corpos de prova mais resistentes ao cisalhamento



Fonte: Autor

#### 4.4 Densidade

Foram realizados os procedimentos de pesagem dos corpos de prova para aferição da massa inicial, massa 6h e 12h depois de colocados na estufa a 100 °C. Posteriormente, foi verificada a condição de massa seca ( $M_s$ ) e então calculou-se a massa de água, massa ideal e volume saturado a 12% de umidade e por último o volume saturado, cujos valores encontrados podem ser conferidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros do ensaio de densidade dos corpos de prova

CP	M <sub>i</sub> (g)	M <sub>1</sub> (6h)	M <sub>2</sub> (12h)	%	X	M <sub>12</sub> (g)	V <sub>12</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>sat</sub> (m <sup>3</sup> )
1	12,51	11,35	11,31	0,35	1,36	12,67	3,33E-05	3,47E-05
2	14,73	13,39	13,36	0,22	1,60	14,96	3,25E-05	3,41E-05
3	12,52	11,34	11,32	0,18	1,36	12,68	3,31E-05	3,48E-05
4	14,37	13,12	13,08	0,30	1,57	14,65	3,29E-05	3,50E-05
5	18,55	16,89	16,83	0,36	2,02	18,85	3,35E-05	3,56E-05
6	18,82	17,14	17,09	0,29	2,05	19,14	3,33E-05	3,65E-05
7	12,41	11,29	11,25	0,35	1,35	12,60	3,28E-05	3,47E-05
8	18,80	17,11	17,08	0,18	2,05	19,13	3,38E-05	3,58E-05
9	14,84	13,53	13,48	0,37	1,62	15,10	3,14E-05	3,43E-05
10	12,64	11,50	11,47	0,26	1,38	12,85	3,38E-05	3,54E-05
11	14,75	13,42	13,38	0,30	1,61	14,99	3,27E-05	3,45E-05
12	18,50	16,84	16,80	0,24	2,02	18,82	3,42E-05	3,55E-05

Fonte: Autor

De posse desses dados, foi possível calcular a densidade básica e aparente, aplicando os valores encontrados nas equações 2.6 e 2.7. Do cálculo realizado foram obtidos os valores finais para a densidade, da forma como sugere a NBR 7190. Os valores encontrados estão dispostos na Tabela 4.5.

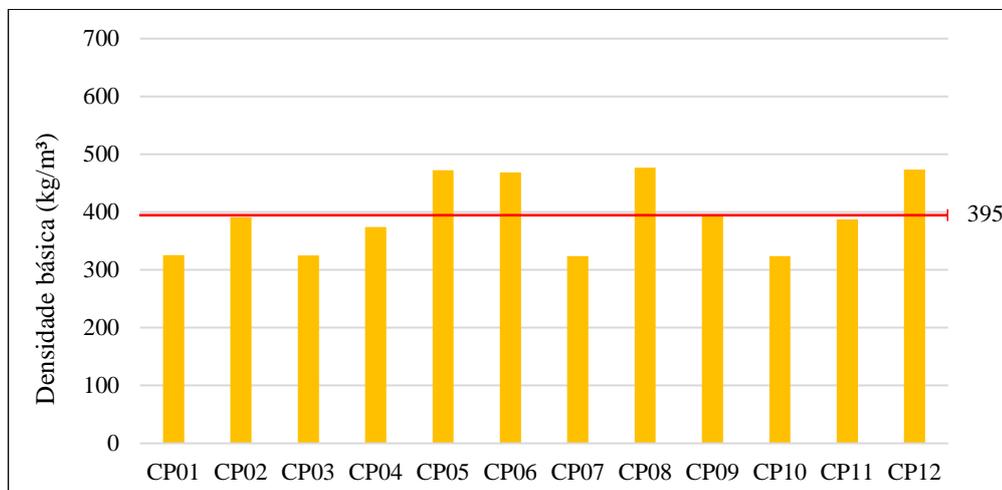
Tabela 4.5 – Densidades dos corpos de prova

Densidade (kg/m <sup>3</sup> )			
Básica ( $\rho_{bas}$ )		Aparente ( $\rho_{ap}$ )	
<b>D07</b>	324	<b>D10</b>	380
<b>D10</b>	324	<b>D01</b>	381
<b>D03</b>	325	<b>D03</b>	383
<b>D01</b>	326	<b>D07</b>	384
<b>D04</b>	374	<b>D04</b>	445
<b>D11</b>	388	<b>D11</b>	458
<b>D02</b>	391	<b>D02</b>	460
<b>D09</b>	393	<b>D09</b>	481
<b>D06</b>	469	<b>D12</b>	550
<b>D05</b>	473	<b>D05</b>	563
<b>D12</b>	474	<b>D08</b>	566
<b>D08</b>	477	<b>D06</b>	574
<b>Média</b>	<b>395</b>	<b>Média</b>	<b>469</b>

Fonte: Autor

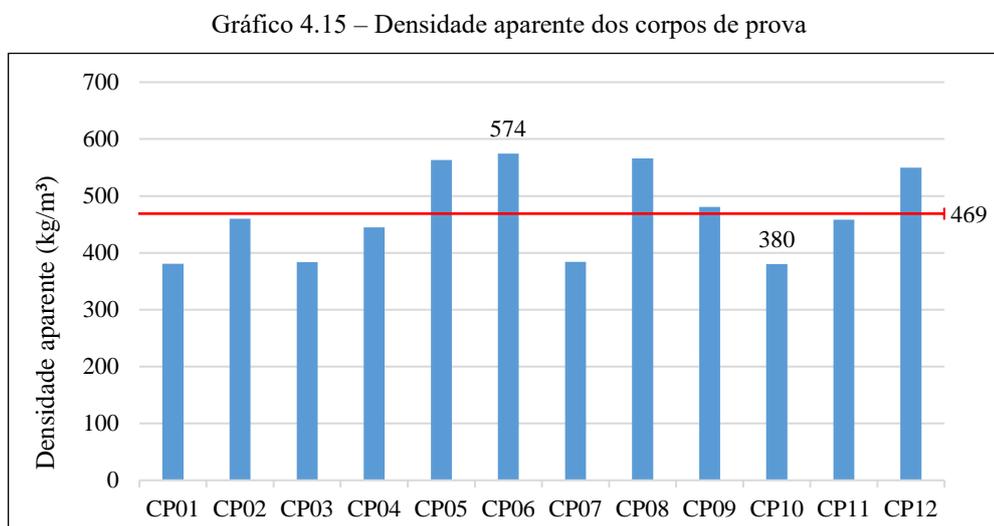
Os valores encontrados para a densidade básica variaram entre 324 e 477 kg/m<sup>3</sup>, tendo como média 395 kg/m<sup>3</sup>, conforme mostrado no Gráfico 4.14.

Gráfico 4.14 – Densidade básica dos corpos de prova



Fonte: Autor

Já para a densidade aparente, os valores encontrados, em geral, foram um pouco maiores do que os observados na densidade básica, variando entre 380 e 574 kg/m<sup>3</sup> e média igual a 469 kg/m<sup>3</sup>, como pode ser visto no Gráfico 4.15:



Fonte: Autor

## 4.5 Classificação

Considerando a utilização das médias obtidas em cada conjunto de amostras, tem-se que os ensaios resultaram nos seguintes valores:

- Compressão: 34 MPa (não saturado) e 26 MPa (saturado);
- Módulo de elasticidade: 3517 (não saturado) e 2837 (saturado);
- Cisalhamento: 4,2 MPa (saturado e não saturado);
- Densidade básica: 395 kg/m<sup>3</sup>;
- Densidade aparente: 469 kg/m<sup>3</sup>.

De acordo com a tabela para dicotiledôneas fornecida pela NBR 7190, é possível classificar a carnaúba a partir dos valores obtidos para as resistências à compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, densidade básica e densidade aparente, conforme a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Classes de resistência das dicotiledôneas folhosas

Dicotiledôneas					
(Valores na condição-padrão de referência U = 12%)					
Classes	$f_{c0k}$ (MPa)	$f_{yk}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{aparente}$ (kg/m <sup>3</sup> )
C 20	20	4	9500	500	650
C 30	30	5	14500	650	800
C 40	40	6	19500	750	950
C 60	60	8	24500	800	1000

Fonte: NBR 7190 (1997)

Portanto, tem-se que para o ensaio de compressão a carnaúba encontrou-se na classe C30, para a condição não saturada. Pelo módulo de elasticidade, a madeira apresentou desempenho abaixo da classe C20. Já no ensaio de cisalhamento, a carnaúba apresentou desempenho compatível com a classe C20.

Quanto às densidades, tanto na básica quanto na aparente a madeira apresentou, também, desempenho abaixo dos valores mínimos referentes à classe C20.

#### 4.6 Resumo

- O ensaio de compressão paralela às fibras teve o melhor desempenho entre a categoria de ensaios destrutivos;
- O módulo de elasticidade encontrado, em geral, foi inferior aos valores encontrados na tabela de classificação, o que mostra que a Carnaúba tende a não suportar grandes tensões sem sofrer deformação permanente;
- Foi observada uma tendência positiva quanto a relação resistência/coloração da carnaúba, tendo como parâmetro principal a proximidade da casca;
- Através do mecanismo de rastreabilidade foi possível perceber que as amostras com melhor desempenho se encontravam, de início, na região inferior ou central do tronco;
- A resistência da madeira na condição de saturação, para os ensaios de compressão e cisalhamento realizados, demonstrou índices inferiores, comparados à condição natural;
- A densidade aparente obteve resultados superiores à densidade básica, o que é correto, visto que a densidade básica trabalha com a razão massa seca / volume saturado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que concerne à comparação dos parâmetros de resistência e densidade encontrados nos ensaios para a carnaúba, foi possível classificá-la, em geral, como uma madeira da classe C30 do grupo das dicotiledôneas, enquanto que a Maçaranduba é compatível com a classe C60, e Eucaliptos, em geral, apresentam resistência à compressão compatível com C20 e resistência ao cisalhamento compatível com C60.

No entanto, devido à tendência observada, pode-se constatar que a resistência da carnaúba está mais concentrada nas regiões de proximidade à casca, que foi, em sua maior parte, retirada no processo de usinagem dos corpos de prova.

Ainda assim, a Carnaúba apresentou considerável desempenho no ensaio de compressão paralela às fibras, associado à baixa densidade do material, que é um fator favorável ao peso próprio da estrutura. Isso mostra uma relação de resistência / peso expressiva, caracterizando uma madeira de resistência acentuada.

Quanto à condição de saturação, notou-se uma queda da resistência no ensaio de compressão, no entanto, no ensaio de resistência ao cisalhamento, foi notado um certo padrão na curva tensão x deformação, o que facilitou a compreensão dos resultados.

Como sugestão para futuros trabalhos, recomenda-se a conclusão do ensaio de tração paralela às fibras, utilizando garras de fixação compatíveis com o formato do corpo de prova, bem como a determinação da rigidez da carnaúba.

Sugere-se também a análise da resistência da Carnaúba na região mais próxima à casca, que obteve resultados mais expressivos nos corpos de prova de identificação C04, C23 (de compressão) e CS01, CS02 (de cisalhamento).

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. A.. **Madeira como material estrutural – Projeto da estrutura da cobertura de um edifício**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 310 p., 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 107 p., 1997.
- BARBOSA, F. R. P.. **Ripa de maçaranduba: uma alternativa de material para o design de jardins verticais**. Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 86 p., 2014.
- CORDEIRO JUNIOR, C. R.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. T. M. L.. **Uso da Madeira na Construção Civil**. Projectus, v. 2, p. 77-91, 2017.
- CALIL JUNIOR; C. MOLINA. **Coberturas em estruturas de madeira: exemplos de cálculo**. 2. ed., São Paulo: Editora Pini LTDA, v. 1, 207 p., 2010.
- COSTA, V.L.S., GOMES, J.M.A. **Crédito e conservação ambiental no extrativismo da carnaúba (Copernicia prunifera (Mill.) H. E. Moore) no nordeste brasileiro no período de 2007 a 2012**. Revista Interações 17, p. 4-14, 2016.
- D'ALVA, O. A.. **O extrativismo da Carnaúba no Ceará**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 193 p., 2004.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo, 104 p., 2013.
- MANFRINATO, M. R.. **Estudo sobre o uso da madeira para fins estruturais e arquitetônicos**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 89 p., 2015.
- MAURO, F. J. P. DI.. **Madeira na construção civil: da ilegalidade à certificação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 267 p., 2013.
- MESQUITA, E. F. T.. **Durabilidade do concreto autoadensável com incorporação do pó de carnaúba**. Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, 104 p., 2011.
- RIBEIRO, E. S.. **Comercialização de madeira serrada de florestas naturais em Mato Grosso: um diagnóstico do setor de base florestal**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 116 p., 2013.
- RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 13 p., 2002.