

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTRUTURAS DE MADEIRA:
IMPLEMENTAÇÃO DE UM *SOFTWARE*
PARA O DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS
TRACIONADAS E COMPRIMIDAS**

DAIRLLA LETHICIA SANTOS OLIVEIRA

JATAÍ-GO
NOVEMBRO/2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico/Tecnológico - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Dairlla Lethicia Santos Oliveira

Matrícula: 20181020260107

Título do Trabalho: Estruturas de madeira: Implementação de um software para o dimensionamento de peças tracionadas e comprimidas

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jataí, 30/11/2022.

Local Data

Dairlla Lethicia S. Oliveira

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

DAIRLLA LETHICIA SANTOS OLIVEIRA

**ESTRUTURAS DE MADEIRA:
IMPLEMENTAÇÃO DE UM *SOFTWARE*
PARA O DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS
TRACIONADAS E COMPRIMIDAS**

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Eulher Chaves Carvalho.

JATAÍ-GO

NOVEMBRO/2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Oliveira, Dairlla Lethicia Santos.

Estruturas de madeira: implementação de um software para o dimensionamento de peças tracionadas e comprimidas [manuscrito] / Dairlla Lethicia Santos Oliveira. -- Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2022.

90 f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Eulher Chaves Carvalho.

Bibliografias.

1. Dimensionamento estrutural. 2. Estrutura de madeira. 3. Esforços axiais. 4. NBR 7190/1997. 5. NBR 7190/2022. I. Carvalho, Eulher Chaves. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.
Bibliotecária - Rosy Cristina O. Barbosa - CRB 1/2380 – C. Jataí. Cód. F063/2022-2.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

DAIRLLA LETHÍCIA SANTOS OLIVEIRA

ESTRUTURAS DE MADEIRA: IMPLEMENTAÇÃO DE UM SOFTWARE PARA O DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS TRACIONADAS E COMPRIMIDAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 19 de novembro de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eulher Chaves Carvalho
Presidente da banca / Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Me. Jeronimo Otoni de Carvalho Neto
Membro Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Eng^a. Civil Thaís Lopes Silva
Membro Externo
GT Arquitetura e Interiores

Documento assinado eletronicamente por:

- Dairlla Lethícia Santos Oliveira, 20181020260107 - Discente, em 05/12/2022 09:48:55.
- Thaís Lopes da Silva, Thaís Lopes da Silva - Estudante - Ifg - Câmpus Jataí (10870883000306), em 01/12/2022 14:06:40.
- Jeronimo Otoni de Carvalho Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/11/2022 15:47:35.
- Eulher Chaves Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/11/2022 15:21:49.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 27/11/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 349632

Código de Autenticação: 077ee0e965



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek, nº 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714

(64) 3605-0837 (ramal: 837)

AGRADECIMENTOS

A DEUS, em primeiro lugar, por ter me dado saúde e ter me conduzido com as devidas lições de empatia, perseverança e resiliência.

Aos meus pais, que sempre estiveram presentes ao meu lado nessa grande jornada até aqui, me dando força, sustentabilidade financeira e, sobretudo amor.

Ao meu noivo que se manteve presente mesmo nos momentos mais difíceis, me apoiando e incentivando com amor, gentileza e compreensão.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil que, através de seus ensinamentos, me proporcionaram conhecimento para finalizar esta jornada.

Por fim, agradeço ao meu orientador que por meses me auxiliou na elaboração deste projeto, com muita compreensão e paciência, dedicando seu tempo para as correções e incentivos proporcionados.

Meu imenso obrigada.

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão
uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse
uma gota.

(Madre Teresa de Calcuta)

RESUMO

A vista do potencial brasileiro em relação às florestas plantadas, o segmento da construção civil tende a crescer cada vez mais, visto que o uso da madeira como material estrutural possui diversas vantagens em relação a outros materiais como concreto e aço, além de contribuir com o meio ambiente e promoção do reflorestamento. À luz deste cenário e a fim de auxiliar acadêmicos e profissionais interessados em trabalhar, na construção civil, com peças estruturais de madeira, propõe-se neste trabalho um *software* focado na verificação de peças estruturais de madeira submetidos à tração e à compressão paralela às fibras. Tal produto baseia-se nas normativas NBR 7190/1997 e NBR 7190/2022, que fixa as condições gerais que devem ser seguidas para a correta construção, desde o projeto, execução e controles das estruturas de madeira. Com a realização de ensaios numéricos, evidencia-se a aplicação do software e viabiliza-se comparações entre os dois instrumentos normativos em questão, evidenciando as principais diferenças entre ambos.

Palavras-Chave: Dimensionamento estrutural, Estruturas de madeira, Esforços axiais, NBR 7190/1997, NBR 7190/2022.

ABSTRACT

In view of the Brazilian potential in relation to planted forests, the civil construction segment tends to grow more and more, since the use of wood as a structural material has several advantages over other materials such as concrete and steel, besides contributing to the environment and promoting reforestation. In light of this scenario and in order to assist academics and professionals interested in working, in civil construction, with wooden structural parts, this paper proposes a software product focused on the verification of wooden structural parts submitted to tension and compression parallel to the fibers. This product is based on the NBR 7190/1997 and NBR 7190/2022 standards, which establish the general conditions that must be followed for the correct construction, from the design, execution and control of wood structures. With the realization of numerical tests, the application of the software is evidenced and comparisons between the two normative instruments in question are made possible, showing the main differences between them.

Keywords: Wooden structures, Structural design, Axial forces, NBR 7190/1997, NBR 7190/2022.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	ASPECTOS GERAIS	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	OBJETIVOS.....	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	METODOLOGIA	19
1.5	ESCOPO	19
CAPÍTULO 2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	MADEIRA	21
2.1.1	Madeiras Plantadas	22
2.1.2	Classificações da madeira.....	26
2.2	DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS TRACIONADAS	30
2.3	DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS COMPRIMIDAS.....	31
2.4	SOFTWARES	32
2.4.1	Software para tração	32
2.4.2	Software VeM.....	33
2.4.3	Software Jwood.....	34
CAPÍTULO 3	DIMENSIONAMENTO PELA NBR 7190/1997.....	36
3.1	CLASSES DE RESISTÊNCIA	36
3.2	COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO	38
3.2.1	Coeficiente 01 devido à classe de carregamento	38
3.2.2	Coeficiente 02 devido à classe de umidade e material	39
3.2.3	Coeficiente 03 devido à categoria.....	39
3.3	ESBELTEZ	40
3.4	ESFORÇOS RESISTENTES EM ESTADO LIMITE ÚLTIMO	41
3.4.1	TRAÇÃO.....	43
3.4.2	COMPRESSÃO.....	44
CAPÍTULO 4	DIMENSIONAMENTO PELA NBR 7190-1/2022	48
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS MADEIRAS	48
4.2	CLASSES DE RESISTÊNCIAS.....	49
4.3	COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO.....	52
4.3.1	Coeficiente de modificação devido à classe de carregamento.....	52
4.3.2	Coeficiente de modificação devido à classe de umidade e material.....	53
4.4	ESTADO LIMITE ÚLTIMO	53

4.4.1	Valores de cálculo da resistência	53
4.4.2	Esforços resistentes.....	54
4.4.3	Solicitações normais	54
4.5	COMPARAÇÕES ENTRE NORMAS	59
CAPÍTULO 5 O SOFTWARE.....		61
5.1	LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO PELA NBR 7190/1997	61
5.2	LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO PELA NBR 7190/2022	65
CAPÍTULO 6 ENSAIOS NUMÉRICOS		69
6.1	ENSAIO DE VERIFICAÇÃO À TRAÇÃO PELA NBR 7190/1997.....	69
6.2	ENSAIO DE VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO PELA NBR 7190/1997 ..	73
6.3	ENSAIO DE VERIFICAÇÃO À TRAÇÃO PELA NBR 7190/2022.....	78
6.4	ENSAIO DE VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO PELA NBR 7190/2022 ..	82
CAPÍTULO 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS		86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Edifício mais antigo em madeira (Horyu-ji).....	15
Figura 1.2 - Edifício <i>Mjøstårnet</i>	15
Figura 1.3 - Edifício <i>Sumitomo Forestry</i>	15
Figura 1.4 - Maiores prédios de madeira no mundo.....	16
Figura 2.1 - Florestas plantadas no Brasil	22
Figura 2.2- Ipê branco	26
Figura 2.3- Peroba	26
Figura 2.4- Pinheiro-do-paraná	27
Figura 2.5- Pinheiro-bravo	27
Figura 2.6 - Tração paralela às fibras	31
Figura 2.7 - Tração normal às fibras	31
Figura 2.8 - Compressão Paralela às fibras	32
Figura 2.9 - Compressão normal às fibras.....	32
Figura 2.10 - Compressão inclinada.....	32
Figura 2.11 - <i>Software</i> executável realizado por Silva (2021)	33
Figura 2.12 - Relatório emitido pelo <i>Software</i> VeM.....	34
Figura 2.13 - <i>Software</i> JWood.....	35
Figura 4.1 – Fluxograma de caracterização das propriedades de resistência e rigidez ..	49
Figura 5.1 – Entrada de dados (resistência à compressão)	61
Figura 5.2 – Entrada de dados (coeficiente de modificação)	62
Figura 5.3 - Cálculo da esbeltez	63
Figura 5.4- Fluxograma do <i>software</i> pela NBR 7190/1997	64
Figura 5.5 – Entrada de dados (resistência à compressão).....	65
Figura 5.6 – Entrada de dados (coeficiente de modificação)	66
Figura 5.7 – Entrada de dados referente à geometria	66
Figura 5.8 - Cálculos fornecidos pelo <i>software</i>	67
Figura 5.9 - Fluxograma do <i>software</i> pela NBR 7190/2022	68
Figura 6.1 – Página 1 do relatório de cálculo para o ensaio 01	71
Figura 6.2 - Página 2 do relatório de cálculo para o ensaio 01.....	72
Figura 6.3 - Página 1 do relatório de cálculo para o ensaio 02.....	76
Figura 6.4 - Página 2 do relatório de cálculo para o ensaio 02.....	77
Figura 6.5 - Página 1 do relatório de cálculo para o ensaio 03.....	80
Figura 6.6 - Página 2 do relatório de cálculo para o ensaio 03.....	81
Figura 6.7 - Página 1 do relatório de cálculo para o ensaio 04.....	84
Figura 6.8 - Página 2 do relatório de cálculo para o ensaio 04.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Classes de umidade	37
Tabela 3.2- Valores conforme as classes de resistência para coníferas.....	37
Tabela 3.3- Valores conforme as classes de resistência para dicotiledôneas	37
Tabela 3.4- Valores de K_{mod1}	39
Tabela 3.5- Valores para K_{mod2}	39
Tabela 3.6- Valores para k_{mod3}	40
Tabela 3.7- Classificação das peças comprimidas conforme a esbeltez.....	41
Tabela 3.8- Coeficientes para ações permanentes	42
Tabela 3.9- Coeficientes para ações variáveis.....	42
Tabela 4.1- Classes de umidade	50
Tabela 4.2- Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos	50
Tabela 4.3- Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais.....	51
Tabela 4.4 - Valores para k_{mod1}	52
Tabela 4.5 - Valores para k_{mod2}	53
Tabela 4.6 - Valores dos coeficientes K_E	57
Tabela 4.7 - Valores do fator β_c	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Técnica Brasileira
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE SÍMBOLOS

$E_{c0,m}$	Valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras
f_{vk}	Resistência característica ao cisalhamento paralela às fibras
f_{mk}	Resistência característica à flexão paralela às fibras
f_{md}	Resistência de cálculo à flexão paralela às fibras
$\rho_{bas,m}$	Densidade básica da madeira
$\rho_{aparente}$	Densidade aparente da madeira
k_{mod}	Coeficiente de modificação
U_{amb}	Umidade relativa do ambiente
U_{eq}	Umidade de equilíbrio
f_{12}	Resistência a 12% de umidade
$U\%$	Umidade da peça
$f_{U\%}$	Resistência a U% de umidade
E_{12}	Rigidez a 12% de umidade
$E_{U\%}$	Rigidez a U% de umidade
t	Espessura das lâminas
r	Menor raio de curvatura das lâminas
L_o	Comprimento teórico de referência
i_{min}	Raio de giração mínimo da peça
γ	Coeficiente de esbeltez
f_{wk}	Resistência característica a tração ou compressão paralela
f_{c0d}	Resistência de projeto à compressão paralela às fibras
f_{c0k}	Resistência característica à compressão paralela às fibras
f_{t0d}	Resistência de projeto à tração paralela às fibras

f_{t0k}	Resistência característica à tração paralela às fibras
γ_w	Coeficiente de ponderação para estados limites decorrentes de tensões de tração ou compressão paralela às fibras
γ_g	Coeficiente de ponderação para ações permanentes
γ_Q	Coeficiente de ponderação para ações variáveis
A	Área da seção transversal da peça
σ_{Nd}	Valor de cálculo da tensão de tração ou compressão devido à força normal
σ_{Md}	Valor de cálculo da tensão de tração ou compressão devido ao momento fletor
M_d	Momento fletor
W	Módulo de resistência
e_d	Excentricidade de projeto
e_1	Excentricidade de primeira ordem
e_i	Excentricidade inicial
e_a	Excentricidade accidental
I	Momento de inércia
F_e	Carga crítica
N_d	Esforço axial na peça
$E_{c0,ef}$	Módulo de elasticidade paralelo às fibras
$E_{0,05}$	Módulo de elasticidade a 0º característico
k_{cx} e k_{cy}	Coeficientes de correção para compressão
$\lambda_{rel,x}$ e $\lambda_{rel,y}$	Índices de esbeltez relativa correspondentes à flexão em relação à x e y
λ_x e λ_y	Índices de esbeltez dos eixos x e y

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados os aspectos gerais relacionados à madeira, juntamente com a justificativa e os objetivos para a realização deste trabalho.

1.1 ASPECTOS GERAIS

A madeira é um dos materiais mais versáteis utilizados pela humanidade ao longo do tempo. As edificações neste material estão entre as mais antigas formas de abrigo, responsáveis por algumas construções com mais de 1000 anos de idade ao longo do mundo (MELLO, 2007).

A madeira tem sido utilizada desde pequenos objetos decorativos até a construção de habitações de grandes dimensões nos dias atuais, abarcando diversos mercados e tornando-se cada vez mais presente para a população. Séculos de experiências no uso da madeira gerou um maior reconhecimento em suas limitações e as dificuldades de ligações, gerando materiais com maior durabilidade e elevando suas potencialidades em seus usos diversos, principalmente na área da construção (BRANCO, 2013).

Especificadamente, a madeira quando utilizada como material estrutural encontra-se normalmente em formas de madeira em tora, madeira serrada, madeira laminada colada, madeira compensada e madeiras reconstituídas, que devem ser conhecidas para seu emprego nas construções (ALMEIDA, 2017).

O complexo de tempos budistas Horyu-ji, localizado no Japão, é considerado a construção em madeira com maior tempo de existência (YAMA, 2021). Estima-se que ele foi construído no ano de 607 pelo príncipe Shotoku (totalizando mais de 1400 anos), apresentando-se com mais de 187.000 metros quadrados de área (Figura 1.1).

Figura 1.1 - Edifício mais antigo em madeira (Horyu-ji)



Fonte: YAMA (2021).

Atualmente, o edifício de madeira mais alto é o *Mjøstårnet*, construído na cidade de *Brumunddal*, na Noruega, com aproximadamente 85,4 metros de altura (Figura 1.2). O *Council on Tall Buildings and Urban Habitat* (CTBUH), com sede em Chicago, nos Estados Unidos, concedeu a ele o título de maior construção de madeira do mundo (MADEIRA E CONSTRUÇÃO, 2019). Ademais, a empresa japonesa *Sumitomo Forestry* planeja a construção de um edifício ainda maior (Figura 1.3), com aproximadamente 340 metros de altura, na cidade de Tóquio, Japão.

Figura 1.2 - Edifício *Mjøstårnet*



Fonte: MADEIRA E CONSTRUÇÃO (2019).

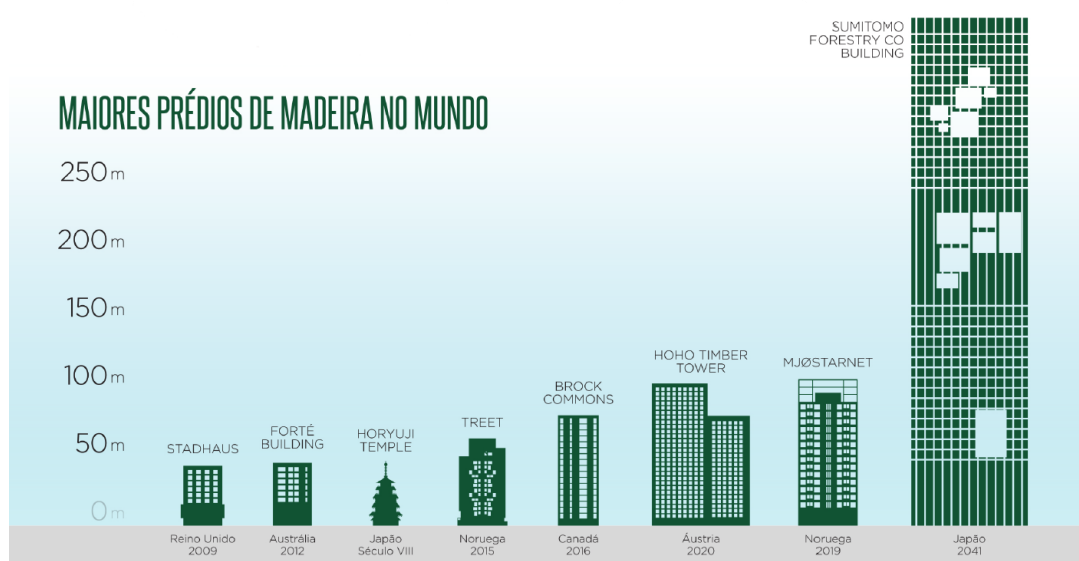
Figura 1.3 - Edifício *Sumitomo Forestry*



Fonte: LYNCH (2018)

Ainda, como representantes no uso da madeira, apresenta-se a seguir (Figura 1.4) os maiores prédios de madeira do mundo, demonstrando a eficácia e o uso ascendente da madeira como material estrutural.

Figura 1.4 - Maiores prédios de madeira no mundo



Fonte: IBÁ (2020).

Contudo, com a crescente necessidade de urbanização e crescimento econômico, a população foi atingida pelos desflorestamentos intensos, que afeta de maneira drástica o meio ambiente. Desta forma, o conceito de reflorestamento se torna cada vez mais presente, em que as indústrias mais capitalizadas têm investido recursos significativos na aquisição de florestas plantadas e na preservação de áreas degradadas. (JUVENAL; MATTOS, 2002)

Tendo em vista o potencial florestal do Brasil, buscou-se a implementação de um *software* gratuito para a verificação de peças submetidas à tração e compressão paralela às fibras, de forma a auxiliar acadêmicos e profissionais interessados nesse setor da construção.

Atualmente, a madeira está sendo empregada de forma essencial nas construções civis, de formas temporárias como instalação de canteiro de obras, andaimes, escoramentos e, de formas definitivas, como esquadrias, estruturas para cobertura, forros, pisos, entre outros (ZENID, 2011).

Zenid (2011) ainda explica que este material possui algumas propriedades que o torna notável, como o baixo consumo de energia para seu processamento, alta resistência, isolamento térmico e elétrico, facilidade de manuseio - tanto para os fabricantes quanto para os trabalhadores finais. Ademais, a fabricação da madeira é sustentada pela

possibilidade de produção através das florestas oriundas do reflorestamento, permitindo assim uma variedade e infindabilidade da matéria prima existente.

Hodiernamente, diversas empresas renomadas lançam programas de dimensionamento de peças de madeira. No entanto, em sua grande maioria, são pagos, como CypeCad, Structures, MetsaWood. Por conseguinte, a criação de um *software* gratuito bem elaborado se torna precípuo à população acadêmica e aos demais engenheiros que almejam aprofundar-se nos conhecimentos referentes às estruturas de madeira em compressão, sobretudo a partir deste ano, em que os programas deixaram de atender à norma recém-atualizada.

Jucá (2006) expõe que os *softwares* educativos possuem características específicas em que, quando os seus desenvolvimentos são fundamentados em uma teoria de aprendizagem, promovem a capacidade do usuário de construir o conhecimento sobre o assunto, buscam a facilidade de atualização dos conteúdos e geram o poder de interação entre o usuário e o programa utilizado. Com o aumento progressivo da globalização e dos recursos novos da tecnologia, os *softwares* promovem eficiência e versatilidade tanto nos meios educacionais, quanto nos meios profissionais, trazendo diversos benefícios cognitivos aos seus usuários.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, a norma que rege o dimensionamento de peças estruturais de madeira no Brasil é a NBR 7190/2022. Em uma edificação, diversos elementos estruturais são submetidos à tração e compressão, sendo de extrema importância serem estudados para promover um local seguro.

Com a introdução acelerada do computador como mediador didático, estão sendo desenvolvidos cada vez mais *softwares* específicos para serem utilizados em contextos de ensino-aprendizagem, denominados *softwares* educacionais. Estas novas tecnologias, quando utilizadas adequadamente como uma vertente educacional, auxiliam no processo de construção de conhecimento, promovendo mais estímulos e eficiência ao processo de ensino-aprendizagem (JUCÁ, 2006).

Neste contexto, este trabalho torna-se relevante uma vez que proporciona aos acadêmicos e profissionais uma alternativa gratuita para o dimensionamento de peças

estruturais de madeira sob tração e compressão paralela às fibras, conforme a norma recentemente alterada, de forma clara, objetiva e dinâmica.

É importante ressaltar que o atual tema é uma sequência do trabalho realizado por Silva (2021), em que foi produzido um *software* na linguagem Python focado na tração das estruturas de madeira, seguindo a norma NBR 7190/1997. Desta forma, buscará promover um trabalho complementar, que auxiliará no dimensionamento de peças de madeira tanto em tração, quanto em compressão (excetuando-se peças esbeltas) segundo as normativas NBR 7190/1997 e NBR 7190/2022, buscando realizar, adicionalmente, um comparativo entre os resultados obtidos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Para o presente trabalho, busca-se a implementação de um *software* para o cálculo da resistência à tração e compressão da madeira conforme as normas NBR 7190/1997 e NBR 7190/2022, a fim de disponibilizar para a comunidade científico-acadêmica um resultado educacional intuitivo e gratuito, podendo auxiliar de forma efetiva no pré-dimensionamento, verificação e cálculos relacionados com os esforços nos elementos estruturais de madeira. À vista disso, cognomina-se o trabalho: “Estruturas de Madeira: implementação de um *software* para o dimensionamento de peças tracionadas e comprimidas.”.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar a linguagem de programação Python;
- Estudar o dimensionamento de peças estruturais de madeira através da norma NBR 7190/1997;
- Estudar o dimensionamento de peças estruturais de madeira através da norma NBR 7190/2022;
- Estudar o *software* e código realizado por Silva (2021), cuja implementação promoveu a verificação de peças tracionadas pela NBR 7190/1997;
- Programar o *software* através da linguagem Python referente à tração e compressão baseando-se nas normativas NBR 7190/1997 (elementos curtos e medianamente esbeltos) e NBR 7190/2022.

- Realizar ensaios numéricos.
- Realizar comparações entre resultados obtidos através das verificações.

1.4 METODOLOGIA

Este estudo adequou-se a uma pesquisa aplicada, com uma abordagem de caráter qualitativo e procedimentos técnicos de uma pesquisa bibliográfica.

Para a análise e coleta das informações que serão utilizadas neste trabalho, os seguintes materiais se tornam necessários: artigos e livros científicos; normas da ABNT; e computador com app do Python instalado.

Seguindo-se para o processo de pesquisa e realização do trabalho, inicialmente foram estudados o dimensionamento das peças de madeira submetidos à tração e compressão paralela às fibras explicitados pela norma NBR 7190/1997 e NBR 7190/2022, e a linguagem de programação Python, a linguagem padrão escolhida para a realização do *software*.

Após os estudos iniciais, foi feita a revisão da bibliografia associada com o tema da pesquisa, a fim de consolidar as ideias. Posteriormente, foi iniciado o desenvolvimento do *software*, especificadamente.

Após a conclusão do *software*, para verificar o autoteste de funcionamento do *software*, ensaios numéricos foram realizados.

Ademais, a linguagem de programação escolhida foi o Python. Tal linguagem se torna proeminente devido à sua simplicidade, clareza e objetividade. Ainda, o Python é um *software* gratuito e utilizado em abundância por diversos programadores, facilitando desta forma a programação e o conhecimento nesta área (MENEZES, 2010).

1.5 ESCOPO

Esse trabalho abordará a verificação de peças tracionadas e comprimidas de madeira, sendo composto por 07 capítulos. O CAPÍTULO 1 se dá pela justificativa e referenciais teóricos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

O CAPÍTULO 2 é constituído pelas classificações da madeira, bem como seu contexto atual no Brasil diante o crescimento do reflorestamento e de iniciativas no

plantio de árvores para uso industrial. Além disso, é relatado sobre a importância dos elementos tracionados e comprimidos na estrutura e a existência de outros *softwares* baseados na verificação de peças de madeira.

No CAPÍTULO 3 apresenta-se os critérios de dimensionamento de uma peça de madeira sob efeito de tração e compressão paralela às fibras, através da antiga revisão NBR 7190/1997.

No CAPÍTULO 4 apresenta-se os critérios de dimensionamento de elementos de madeira sob efeito de tração e compressão paralela às fibras, através da atual edição NBR 7190/2022, bem como as principais diferenças entre as revisões de 1997 e 2022.

No CAPÍTULO 5 apresenta-se a lógica de programação do *software*, baseando-se na NBR 7190/1997 e NBR 790/2022. O CAPÍTULO 6 traz alguns ensaios numéricos a fim de exemplificar os dimensionamentos e compará-los com resultados do programa.

Por fim, o CAPÍTULO 7 são as considerações finais do trabalho, adicionando promoções de trabalhos futuros possíveis.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MADEIRA

A madeira é um material renovável e versátil, devido as suas propriedades físico-mecânicas e anatômicas. Comparando-a com outros tipos de materiais, como concreto, plástico, aço e alumínio, ela traz diversas vantagens como beleza, alta resistência mecânica em relação à massa, baixo consumo energético na etapa de processamento, bom isolante térmico, fácil trabalhabilidade, entre outros. O desconhecimento dos seus atributos e características dificulta a promoção correta para diversas utilizações, verificando-se pela baixa quantidade de madeira utilizada para elementos estruturais, quando comparada com a quantidade de matéria prima existente. (VIDAL et al., 2015)

Atualmente no Brasil, ainda existem diversos preconceitos em relação ao emprego da madeira como elemento estrutural, devendo-se principalmente pelo desconhecimento do material e pela falta de projetos específicos e bem elaborados. Desta forma, grande parte das construções de madeira se tornam vulneráveis, por execuções mal feitas e ausência de projetos, acarretando no aumento do estigma acerca deste material (GESUALDO, 2003)

Do ponto de vista ambiental, a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2013) cita que uma gestão responsável focada no reflorestamento reduz as pressões sobre as florestas nativas, promovendo por consequência que as árvores naturais sejam protegidas e conservadas. Desta forma, ao promover uma alternativa economicamente sustentável proveniente dos plantios florestais, o desmatamento das florestas nativas pode ser evitado.

Segundo a ABRAF (2013), o setor de florestas plantadas contribui com uma parcela importante na geração de produtos, empregos, bem-estar e tributos. Tais florestas disponibilizam uma série de serviços sociais e ambientais, indo desde a reabilitação de terras degradadas, o combate à desertificação do solo, sequestro e armazenamento de carbono, até a amenização das paisagens. Além destes, também contribuem para a complementação e suplementação das iniciativas de redução das emissões de gases de efeito estufa advindos do desmatamento e degradação florestal.

Conforme dados disponibilizados pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), o Brasil possuía mais de 9,5 milhões de hectares de árvores plantadas no ano de 2020, responsáveis por 91% de toda a madeira produzida para usos comerciais. Entre as árvores reflorestadas estão espécies exóticas, como eucaliptos, pinus e teca. (IBÁ, 2021)

A utilização da madeira na construção civil pode gerar diversos benefícios. Entre eles destacam-se a agilidade da construção, podendo ser de 30 a 50% inferior, menor geração de resíduos sólidos e desperdício (cerca de 20% a 30%) e edificação com o peso final menor, resultando em menos emissão de CO₂ (IBÁ, 2021).

2.1.1 Madeiras Plantadas

O setor de florestas plantadas promove inúmeros produtos de origem sustentável e renovável essenciais para o dia a dia da população, tornando a economia cada vez mais dependente deste setor e podendo promover mudanças econômicas locais ao oferecer novas oportunidades de trabalho, gerar renda para a população e contribuição na adaptação e mitigação das mudanças climáticas e provisão de serviços ecossistêmicos. (IBÁ, 2021). A seguir apresenta-se uma imagem aérea de uma plantação de árvores no Brasil (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Florestas plantadas no Brasil

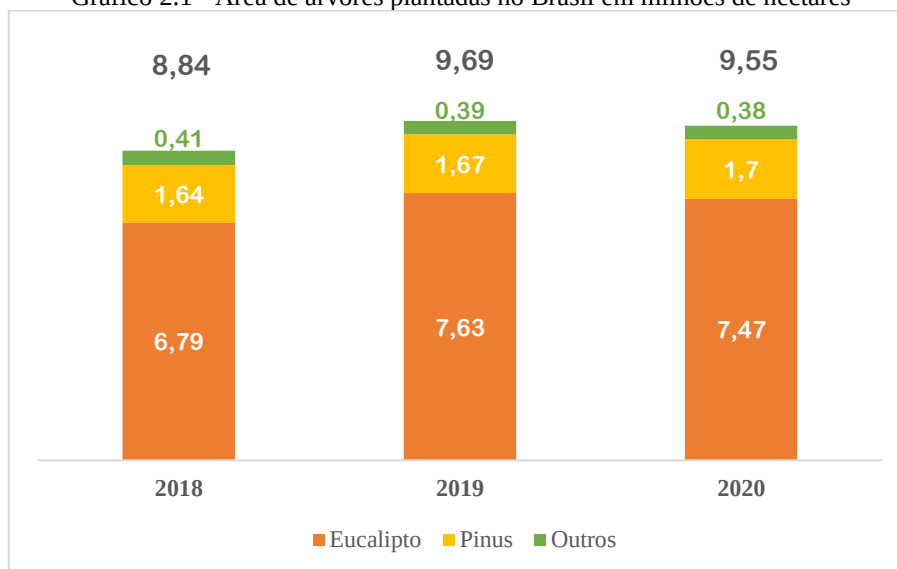


Fonte: IBÁ (2021).

Segundo o IBÁ (2021), os milhões de hectares de árvores plantadas no Brasil para usos industriais, no ano de 2020, são de eucaliptos, pinus e demais espécies (Gráfico 2.1),

atuantes principalmente em áreas anteriormente degradadas pela ação humana. Tais árvores cultivadas colocam o Brasil como referência mundial na produção de celulose e papel, siderurgia e carvão vegetal, painéis de madeira e pisos laminados, produtos sólidos de madeira e outros.

Gráfico 2.1 - Área de árvores plantadas no Brasil em milhões de hectares

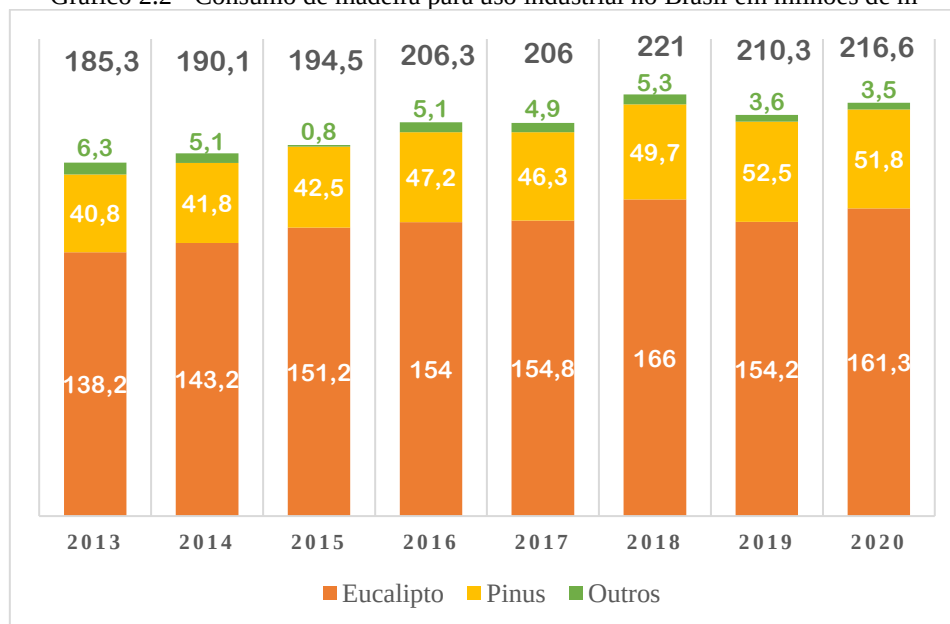


Fonte: IBÁ (2021).

Conforme demonstrado no Gráfico 2.1, a área total de árvores plantadas no ano de 2020 foi superior ao ano de 2018, porém inferior ao ano de 2019.

Tais aumentos de árvores plantadas sugerem que a população está fazendo um uso maior da madeira. Em 2020, o consumo de madeira oriunda de árvores plantadas para uso industrial avançou 3,0%, frente ao ano de 2019, atingindo a marca de 216,6 milhões de m³, podendo ser demonstrado pelo Gráfico 2.2 a seguir:

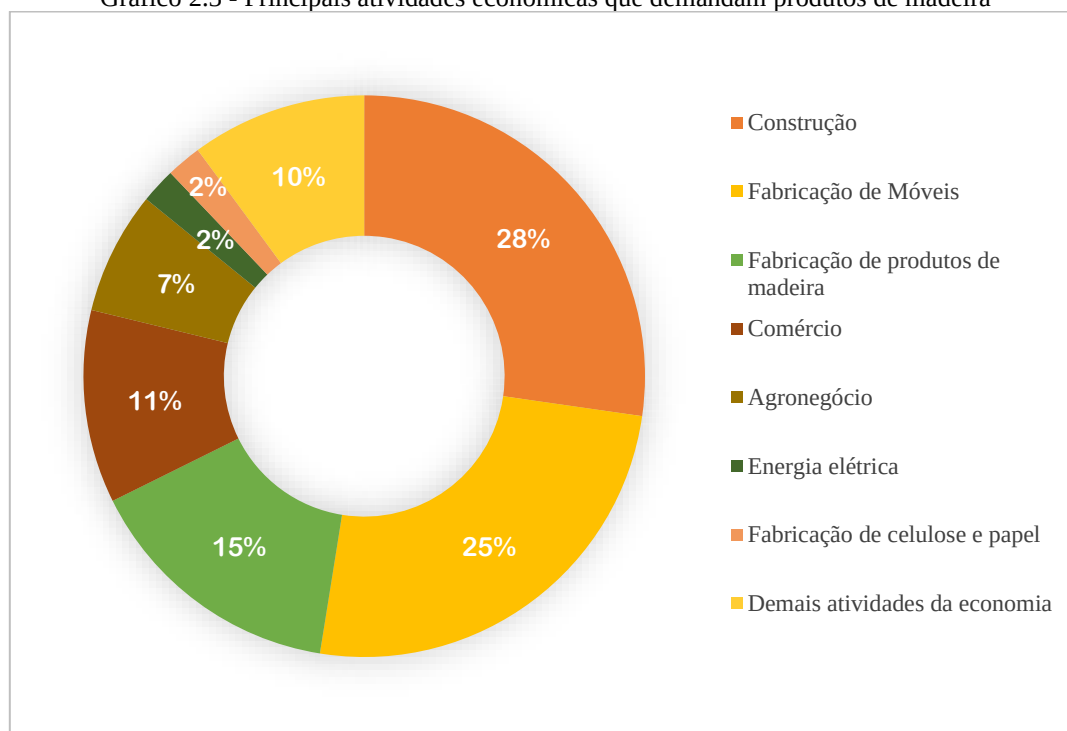
Gráfico 2.2 - Consumo de madeira para uso industrial no Brasil em milhões de m³



Fonte: IBÁ (2021).

Verificando-se o Gráfico 2.2, há um aumento no consumo da madeira para uso industrial de aproximadamente 17% entre os anos de 2013 e 2020. Esse consumo pode ser discriminado em algumas atividades econômicas principais no Brasil, conforme o Gráfico 2.3:

Gráfico 2.3 - Principais atividades econômicas que demandam produtos de madeira



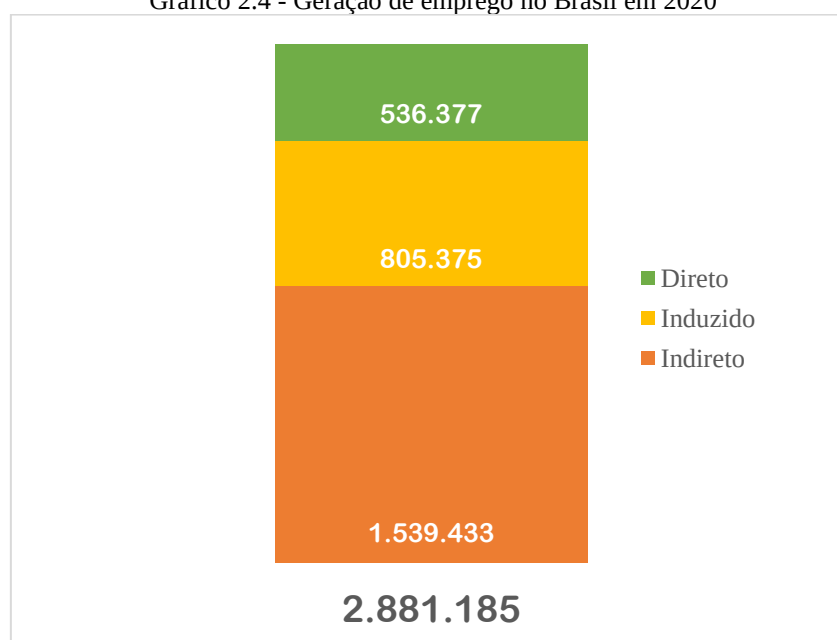
Fonte: IBÁ (2021).

Analisando as 03 (três) principais atividades econômicas que demandam os produtos de madeira (Construção, Fabricação de Móveis e Fabricação de produtos de madeira), responsáveis por 68%, o IBÁ (2021) cita que os principais produtos demandados no Brasil são:

- Desdobramento de madeira, estruturas de madeira e produtos de carpintaria para construção;
- Produtos de madeira laminada e de chapas de madeira compensada, prensada e aglomerada;
- Artefatos de madeira, palha, cortiça, vime e material trançado não especificados anteriormente, exceto móveis.

Ainda que a atividade sustentável de reflorestamento tradicionalmente atue fora dos principais eixos econômicos e financeiros, gera diversos empregos e rendas, sejam elas de formas diretas, indiretas ou induzidas, demonstrado no Gráfico 2.4.

Gráfico 2.4 - Geração de emprego no Brasil em 2020



Fonte: IBÁ (2021).

Esse amplo efeito multiplicador do emprego deve-se ao fato de que as cadeias produtivas originadas pela agroindústria são longas e ramificadas, estando presentes em produtos finais tão diversos quanto móveis, embalagens em geral, construção civil, papeis higiênicos, siderurgia, automóveis e livros.

2.1.2 Classificações da madeira

A madeira é considerada um dos materiais utilizados na construção civil mais antigos, devido a sua disponibilidade na natureza e sua relativa facilidade de manuseio. Além disso, a madeira possui características favoráveis à construção como facilidade de fabricação de diversos produtos industrializados e bom isolamento térmico. No entanto, como desvantagens, este material está sujeito à degradação biológica por ataque de fungos, brocas, entre outros, à ação do fogo e por ser um elemento natural, apresenta defeitos como nós e fendas que, desta forma, interfere em suas propriedades mecânicas (PFEIL; PFEIL, 2003).

Conforme Pfeil & Pfeil (2003), as madeiras utilizadas na construção civil que são obtidas pelos troncos de árvores classificam-se em duas categorias principais: madeiras duras ou dicotiledôneas e madeiras macias ou coníferas.

2.1.2.1 Madeiras duras, dicotiledôneas ou folhosas

As dicotiledôneas são provenientes de árvores frondosas, da classe Angiosperma, definidas por folhas achatadas e largas e crescimento lento. Podem ser citados como exemplos o ipê (Figura 2.2), aroeira, carvalho, peroba (Figura 2.3) etc.

Figura 2.2- Ipê branco



Fonte: MERCADANTE (2014)

Figura 2.3- Peroba



Fonte: CAIMI (2011)

2.1.2.2 Madeiras macias ou coníferas

As coníferas são provenientes das árvores da classe Gimnosperma, com folhas em formas de agulha ou escamas e crescimento rápido. Como exemplos podem ser citados os pinheiros europeus, pinheiro-do-paraná (Figura 2.4), pinheiro-bravo (Figura 2.5) etc.

Figura 2.4- Pinheiro-do-paraná



Fonte: MANOSSO (2011)

Figura 2.5- Pinheiro-bravo



Fonte: SANTOS (2006)

Salienta-se que tais categorias acima citadas são classificadas a partir das estruturas celulares dos troncos e não especificamente de suas resistências.

Pfeil & Pfeil (2003) ainda destacam que as dicotiledôneas normalmente perdem suas folhas no outono e as coníferas mantêm suas folhas verdes durante todo o ano.

Além das classificações descritas acima, Pfeil & Pfeil (2003) ainda relatam que as madeiras utilizadas nas construções podem ser subdivididas em 02 categorias: madeiras maciças e industrializadas.

2.1.2.3 Madeiras maciças

As madeiras maciças se subdividem em: madeira bruta ou roliça, madeira falquejada e madeira serrada. A seguir apresenta-se suas definições conforme descritas por Pfeil & Pfeil (2003).

2.1.2.3.1 Madeira bruta ou roliça

É empregada em forma de tronco, sendo mais utilizados como estacas, escoramentos, postes colunas etc. Para sua fabricação, as árvores são abatidas, preferencialmente na época da seca, objetivando um tronco com menor teor de umidade. Após o abatimento, deve-se remover a casca e deixar o tronco secar, atingindo um ponto de equilíbrio com a umidade atmosférica.

2.1.2.3.2 Madeira falquejada

É uma madeira obtida através do corte dos troncos com machado, sendo constituídos as partes laterais como perdas.

2.1.2.3.3 Madeira serrada

É o produto estrutural de madeira mais comum. Para a sua fabricação, as peças são cortadas nas serrarias, em dimensões padronizadas comercialmente, seguindo para um período de secagem. Os comprimentos das toras são limitados por problemas de transporte e manejo, limitando-se geralmente até 6 metros.

2.1.2.4 Madeiras industrializadas

As madeiras industrializadas se subdividem em: madeira compensada, madeira laminada ou colada e madeira recomposta. A seguir apresenta-se suas definições conforme descritas por Pfeil & Pfeil (2003).

2.1.2.4.1 Madeira compensada

É o produto da madeira mais antigo, sendo formado pela colagem de 03 ou mais lâminas finas (normalmente em quantidades ímpares), com as direções das fibras alternadamente ortogonais. Tal forma de colagem promove um produto mais isotrópico que a madeira maciça, possuindo vantagens como:

- Pode ser fabricada em grandes folhas, limitando os defeitos;
- Reduz retração e inchamento, devido a ortogonalidade de direção das fibras nas camadas adjacentes;
- Torna-se mais resistente na direção normal às fibras;

- Reduz trincas na cravação de pregos;
- Permite a utilização de madeiras mais resistentes nas partes exteriores e madeiras menos resistentes nas partes inferiores, sendo uma técnica vantajosa em algumas aplicações.

Possuindo tal madeira industrializada diversas vantagens acima citadas, seu preço se torna mais elevado, sendo considerado uma de suas desvantagens.

2.1.2.4.2 Madeira laminada ou colada

É uma madeira cortada em lâminas (de 15 a 50 mm de espessura e geralmente com seções retangulares), coladas com adesivos sob pressão para formar grandes vigas, sendo com as fibras das lâminas coladas em direções paralelas entre si. Tais produtos industrializados, por serem fabricados sob rígidos padrões de controle de qualidade com garantias de resistência e durabilidade, possuem algumas vantagens em relação às madeiras maciças, como:

- Permite a confecção de peças com elevadas dimensões;
- Permite melhor controle sobre a umidade das lâminas, reduzindo, portanto, defeitos provenientes de secagens irregulares;
- Permite a seleção da qualidade das lâminas, podendo-se escolher entre os locais com maiores tensões;
- Permite a construção de peças de eixo curvo, convenientes para peças de arcos, tribunas e cascas.

Ainda, como sua desvantagem principal, pode-se destacar os valores de venda, que por processos mais robustos, promovem peças de melhor resistência e qualidade.

2.1.2.4.3 Madeira recomposta

É uma designação de um produto em formas de placas, desenvolvidos a partir de madeira em flocos, lamelas, lâminas ou partículas. Em geral, estas placas não são consideradas materiais estruturais, devido às baixas resistências e durabilidade, sendo

então utilizadas majoritariamente na indústria de móveis, possuindo, portanto, baixos custos e valores comerciais.

Atualmente, tem-se a existência de novos tipos de madeira industrializada: Madeira lamelada colada (MLC) e madeira lamelada colada cruzada (MLCC). Conforme Segundinho *et al.* (2015), a MLC é um material formado a partir da colagem de peças de madeira selecionadas em formato de lamelas dispostas com as fibras paralelas entre si, fixadas individualmente através de adesivos estruturais, a fim de permitir variadas formas para elementos construtivos.

Já a MLCC, ou Cross Laminated Timber (CLT) é um derivado da madeira de elevada capacidade de carga e de reduzido peso próprio. Nascido na Suíça em 1990 e desenvolvido na Áustria, este material utiliza o mesmo conceito de fabricação dos lamelados colados através da colagem de camadas sucessivas de tábuas de madeira de forma cruzada em relação à orientação do grão da madeira. (SILVA, 2014)

Ainda, Silva (2014) explica que as posições de colagem das lamelas de madeira interferem nas propriedades mecânicas finais do material. Tal diferença faz com que a MLC adquira resistência em apenas uma direção, conferindo-a maior capacidade à compressão e aos esforços verticais, quando comparada com a MLCC.

Por conta da diversidade das madeiras e suas diferentes características, é de extrema importância que seja conhecido o seu tipo, para que os cálculos de dimensionamento estejam o mais próximo da realidade, diminuindo assim as margens de erro.

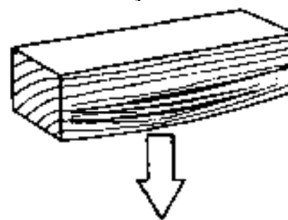
2.2 DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS TRACIONADAS

Os elementos de madeira submetidos à esforços axiais de tração apresentam comportamento elastofrágil até a ruptura, sem a ocorrência de grandes deformações anteriores ao rompimento da peça. Na madeira, o esforço de tração pode ocorrer em duas orientações: paralela às fibras e normal às fibras. A tração paralela às fibras provoca o alongamento das células ao longo do eixo longitudinal (Figura 2.6) e a tração normal às fibras tende a separar as células de forma perpendicular aos seus eixos (Figura 2.7). (SZÜCS *et al.*, 2015)

Figura 2.6 - Tração paralela às fibras



Figura 2.7 - Tração normal às fibras



Fonte: Ritter (1990)

A ruptura por tração paralela às fibras pode ocorrer pelo deslizamento entre as células ou pela ruptura de suas paredes, verificando-se por baixos valores de deformações (caracterizado como frágil) e elevados valores de resistência. Já a ruptura por tração normal às fibras, a solicitação afeta a integridade estrutural da madeira, obtidos por baixos valores de deformação e resistência. (SZÜCS et al., 2015)

Segundo Pfeil & Pfeil (2003), diversos sistemas estruturais em madeira apresentam peças tracionadas, como tirantes e pendurais, contraventamentos de pórticos, hastes de treliças, entre outros.

2.3 DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS COMPRIMIDAS

A compressão na madeira pode ocorrer em três formas de orientação: paralela às fibras, normal às fibras e inclinada às fibras. Quando a peça é submetida à compressão paralela às fibras (foco deste trabalho), as forças agem paralelamente ao comprimento das células (Figura 2.8). As células da madeira reagem em conjunto promovendo uma grande resistência final. Em casos de solicitação normal ou perpendicular às fibras, a madeira apresenta resistências menores, pois as forças são aplicadas na direção normal aos comprimentos das células (Figura 2.9), podendo chegar a 0.25% do valor quando comparada com a resistência paralela às fibras. (SZÜCS et al., 2015)

Ainda, Szücs *et al.* (2015) expõem que o efeito da compressão paralela é de encurtar as células da madeira ao longo do seu eixo longitudinal, enquanto que o da compressão normal comprime as células da madeira no eixo transversal. Já a compressão inclinada, é um conjunto das compressões paralelas e normais (Figura 2.10).

Figura 2.8 - Compressão Paralela às fibras



Figura 2.9 - Compressão normal às fibras

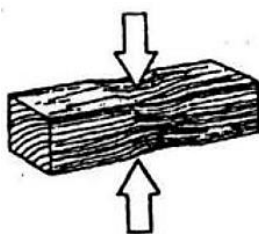
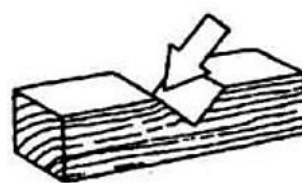


Figura 2.10 - Compressão inclinada



Fonte: Ritter (1990)

Segundo Pfeil & Pfeil (2003), peças submetidas à compressão podem ser encontradas facilmente em sistemas de contraventamentos, componentes de treliças, colunas e pilares, entre outros, demonstrando tamanha importância do estudo da compressão das peças de madeira para elementos estruturais. Elementos denominadas esbeltas, isto é, com o comprimento elevado quando comparado com as dimensões da seção transversal, sofrem de curvaturas iniciais sob compressão axial que reduzem a resistência final da coluna quando comparado com peças curtas, pois tal elemento depende não apenas da resistência do material, quanto de sua rigidez à flexão.

Para a caracterização simplificada das resistências da madeira de espécies usuais, a NBR 7190/1997 admite algumas relações que se fazem a partir de ensaios de compressão paralela às fibras. Isto é, em todas as relações simplificadas de resistência usadas nos cálculos de dimensionamento, basta saber o valor da resistência da compressão paralela às fibras.

2.4 SOFTWARES

A NBR 7190 foi atualizada no dia 29 de junho de 2022. É necessário ressaltar que a fundamentação deste trabalho foi feita tendo em base a regulamentação teórica de 1997 e também da atual norma em vigor. Ademais torna-se indispensável destacar que os *softwares* que foram desenvolvidos e demonstrados a seguir tiveram como respaldo o que fora regulamentado por meio da antiga norma de 1997 e da proposta de revisão de 2012.

2.4.1 Software para tração

No ano de 2021, Silva (2021) elaborou um *software* de verificação e dimensionamento estrutural de peças de madeira submetidas ao esforço de tração paralela às fibras a partir da antiga normativa NBR 7190/1997.

Inicialmente, o programa solicita a resistência característica à tração paralela às fibras e o coeficiente de modificação. Caso não seja de conhecimento do usuário, devem ser informados as características da peça, para que o programa possa recolher as informações necessárias para calcular a resistência de cálculo à tração. Logo após, é solicitado as geometrias das peças (dimensões da seção transversal) para finalmente ser determinado o esforço solicitante de cálculo e a força de ruptura à tração. A Figura 2.11 mostra a parte inicial do *software* realizado por Silva (2021).

Figura 2.11 - *Software* executável realizado por Silva (2021)

```

== Determinação do esforço solicitante de cálculo à tração paralela às fibras da madeira ==
Você saberia informar o valor da resistência à tração paralela às fibras da madeira que você está trabalhando?
[1] SIM
[2] NÃO
Qual seria a opção?2
Você saberia informar o valor da resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira que
você está trabalhando?
[1] SIM
[2] NÃO
Qual seria a opção?2
Então, vamos escolher uma classe de resistência!
Você pretende trabalhar com CONÍFERA ou DICOTILEDÔNEA?
[1] CONÍFERAS
[2] DICOTILEDÔNEAS
Qual seria a opção?2
Dentre as classes apresentadas abaixo:
[1] C20
[2] C30
[3] C40
[4] C60
Qual a classe de resistência te atenderia?3
Você saberia informar o valor do coeficiente de modificação?
[1] SIM
[2] NÃO
Qual seria a opção?2
Então vamos determinar o coeficiente de modificação!

```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

2.4.2 *Software* VeM

Em 2012, a Associação Brasileira de Normas Técnicas elaborou uma proposta de revisão para norma NBR 7190/1997, que rege sobre o dimensionamento de peças em madeira.

Cofani (2016) desenvolveu um *software* chamado de VeM para dimensionamento de pilares em madeira, submetidos à compressão e à flexo-compressão conforme a proposta de revisão da norma NBR 7190/2012. O programa foi desenvolvido no “Lazarus”, que possui como base a linguagem Pascal e compilador FreePascal.

O funcionamento do programa consiste na entrada dos dados pelo usuário, seguido do cálculo das propriedades do material e cálculo das propriedades geométricas. Posteriormente, faz a verificação do elemento à ruptura, verificação do elemento à estabilidade e por fim todos os resultados são indicados em um relatório próprio, exemplificado pela Figura 2.12. (COFANI, 2016)

Salienta-se que, devido ao *software* VeM ser baseado na proposta de revisão NBR 7190/2012, os resultados poderão ser diferentes quando comparados com programas realizados à luz da NBR 7190/1997 ou NBR 7190/2022.

Figura 2.12 - Relatório emitido pelo *Software* VeM

- Verificação do Estado Limite de Serviço (Esbeltez):					
Condições para a Esbeltez $\lambda_x = L0x / \sqrt{I_x/A} \leq 140$ e $\lambda_y = L0y / \sqrt{I_y/A} \leq 140$					
O elemento estrutural está verificado quanto ao ELS de Esbeltez ($\lambda \leq 140$).					
- Verificação dos Estados Limites Últimos:					
$\sigma_{c0,d}$: 2.40 MPa	β_c : 0.1	K_x : 0.844	K_y : 1.843	K_{cx} : 0.896	K_{cy} : 0.362
- Verificação do Elemento à Ruptura:					
Condição para a Resistência à Ruptura $\sigma_{c0,d} \leq f_{c0,d}$					
A seção transversal está verificada quanto à ruptura.					
- Verificação do Elemento à Estabilidade:					
Condições para a Tensão: Condição 1b: $\sigma_{c0,d} / (k_{cx} \cdot f_{c0,d}) \leq 1$					
Condição 2b: $\sigma_{c0,d} / (k_{cy} \cdot f_{c0,d}) \leq 1$					
Condições para a Tensão: Condição 1b: 0.16 Condição 2b: 0.39					
O elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade.					
Aproveitamento da seção transversal para Condição 1b: 16 %					
Aproveitamento da seção transversal para Condição 2b: 39 %					

Fonte: Cofani (2016)

2.4.3 *Software* Jwood

O *software* Jwood, criado pelos alunos Juliano Lima da Silva e Zacarias Martin Chamberlain Pravia no ano de 2014, faz a aplicação dos conceitos da revisão da NBR 7190/2012. Seu campo de aplicação abrange o dimensionamento de elementos de madeira submetidos aos esforços de tração, compressão, flexão e flexocompressão. Sua interface e código foram criados através da linguagem de programação Java, contando com abas separadas por etapas de cálculo.

Na primeira aba é solicitado a classe de resistência da peça de madeira, divididos em coníferas e dicotiledôneas. Após a confirmação da classe, na segunda e terceira aba são solicitados os coeficientes parciais de modificação (k_{mod1} , k_{mod2} e k_{mod3}) para o cálculo do coeficiente de modificação e o fator β_c . Na quarta aba são solicitadas as dimensões da peça (seção transversal e comprimento teórico), para o cálculo dos índices de esbeltez, momento de inércia e módulo de resistência. Por fim, são liberadas as abas para cálculo de tração, compressão e flexão. A interface do programa Jwood é mostrado na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Software JWood

JWood v1.00

Classe de Resistência | kmod1 e 2 | kmod3 | Geometria | Tração | **Compressão** | Flexão | Verificações - Flexão | Flexocompressão | Relatório

Definição de f_{cd}

$$f_{cd} = k_{mod} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_w}$$

Ywt = 1.4

kmod = 0.512

f_{ck} = 2.5 kN/cm²

f_{cd} = kN/cm²

Cálculo de $E_{0,05}$

$$E_{0,05} = 0,7 \cdot E_{cm}$$

E_{cm} = 850.0 kN/cm²

$E_{0,05}$ = kN/cm²

Cálculo de $\lambda_{rel,x}$ e $\lambda_{rel,y}$

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{E_{0,05}}}$$

$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{E_{0,05}}}$

Cálculo de k_x e k_y

BC = 0.2

$$k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2]$$

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2]$$

k_x = k_y =

Cálculo de k_{cx} e k_{cy}

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}}$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}}$$

k_{cx} = k_{cy} =

Resistência à Compressão

$$N_{cd} = k_{c(x,y)} \cdot f_{cd} \cdot A$$

N_{cd} = kN

INSTRUÇÕES:

Calcule a resistência característica à compressão, então continue a série de cálculos para obter a resistência à compressão através dos botões Calcular.

Então, clique no botão A para adicionar ao Relatório para registrar os cálculos realizados.

v1.00

Fonte: Silva & Pravia (2018)

CAPÍTULO 3 DIMENSIONAMENTO PELA NBR 7190/1997

A NBR 7190/1997 fixa as condições gerais a serem seguidas na realização de projetos, execução e controle de estruturas de madeira, como pontes, pontilhões, coberturas, pisos e cimbres. Em 2022, esta norma foi atualizada, portanto, não está mais em vigor.

Desta forma, apresenta-se as principais ações e definições expostos na norma citada, dando enfoque para as peças de madeira sob efeitos de tração e compressão, a fim de servir como ponto de cotejamento com a normativa em vigor, a qual virá em destaque no CAPÍTULO 4 deste trabalho, que em culminação pontua as diferenças mais proeminentes.

3.1 CLASSES DE RESISTÊNCIA

A resistência da madeira é a sua aptidão a suportar tensões variadas. Convencionalmente, os valores de resistências são as máximas tensões que podem ser aplicadas aos corpos de prova, momento antes do aparecimento de fenômenos particulares de comportamento como deformação específica excessiva, ou até mesmo a ruptura.

As classes de resistência das madeiras, conforme a NBR 7190/1997, objetivam padronizar madeiras com propriedades semelhantes, a fim de orientar a definição do material quando iniciar o processo de elaboração de projetos estruturais. As peças de madeira são enquadradas em 02 tabelas, divididas entre si pelo tipo: coníferas e dicotiledôneas.

Para melhores resultados, os efeitos de duração dos carregamentos, da qualidade e da umidade do meio ambiente devem ser levados em consideração, sendo analisados nos coeficientes de modificação k_{mod} . Para isso, a norma propõe as classes de umidade, demonstrados da Tabela 3.1, permitindo não só ajustar as propriedades de resistência e rigidez da madeira utilizada, mas também auxiliar na escolha de métodos de tratamentos preservativos.

Tabela 3.1- Classes de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente (Uamb)	Umidade de equilíbrio da madeira (Ueq)
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 1997.

Desta forma, os valores expostos nas Tabela 3.2 e Tabela 3.3 a seguir, são correspondentes à classe de umidade 01, constituído pela norma como condição-padrão de referência e definido pelo teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%.

Tabela 3.2- Valores conforme as classes de resistência para coníferas
Coníferas (Valores na condição-padrão de referência U=12%)

Classes	f_{c0k} (Mpa)	f_{vk} (Mpa)	$E_{c0,m}$ (Mpa)	1) $\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	ρ aparente (kg/m ³)
C20	20	4	3500	400	500
C25	25	5	8500	450	550
C30	30	6	14500	500	600
1) Como definida em 6.1.2.					

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 1997.

Tabela 3.3- Valores conforme as classes de resistência para dicotiledôneas
Dicotiledôneas (Valores na condição-padrão de referência U=12%)

Classes	F_{c0k} (Mpa)	F_{vk} (Mpa)	$E_{c0,m}$ (Mpa)	1) $\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
C20	20	4	9500	500	650
C30	30	5	14500	650	800
C40	40	6	19500	750	950
C60	60	8	24500	800	1000
1) Como definida em 6.1.2.					

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 1997.

Em que f_{c0k} é a resistência característica à compressão paralela às fibras, $E_{c0,m}$ é o valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, f_{vk} é a resistência ao cisalhamento paralela às fibras, $\rho_{bas,m}$ é a densidade básica da madeira e $\rho_{aparente}$ é a densidade aparente da madeira.

Caso a madeira utilizada possua umidade relativa contida no intervalo entre 10% e 20%, devem ser calculados os valores corrigidos da resistência e rigidez para a umidade padrão de 12%, seguindo as Equações (3.1) e (3.2).

$$f_{12} = f_{u\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (3.1)$$

$$E_{12} = E_{u\%} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (3.2)$$

3.2 COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO

Os valores de cálculo relacionados às propriedades da madeira são afetados pela classe de carregamento da estrutura, pela classe de umidade e pela qualidade do material. À vista disso, a norma traz como necessário a implantação de um coeficiente de modificação (K_{mod}), que considera os 03 atributos acima citados. Tal coeficiente é obtido pela Equação (3.3) a seguir.

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} \quad (3.3)$$

3.2.1 Coeficiente 01 devido à classe de carregamento

O coeficiente parcial de modificação k_{mod1} leva em consideração a classe de carregamento que a peça de madeira está sujeita e o tipo de material empregado, seguindo a Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Valores de K_{mod1}

Classes de Carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada, Madeira laminada colada e Madeira compensada	
	Madeira serrada, Madeira laminada colada e Madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 1997.

3.2.2 Coeficiente 02 devido à classe de umidade e material

O coeficiente parcial de modificação k_{mod2} leva em consideração a classe de umidade e o tipo de material empregado, exposto na Tabela 3.5. Ressalta-se que para o caso específico de madeira serrada submersa, adota-se o valor de $k_{mod2} = 0,65$.

Tabela 3.5- Valores para K_{mod2}

Classes de umidade	Madeira serrada, madeira laminada colada e madeira compensada	
	Madeira serrada, madeira laminada colada e madeira compensada	
	Madeira serrada, madeira laminada colada e madeira compensada	Madeira recomposta
(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 1997.

3.2.3 Coeficiente 03 devido à categoria

O coeficiente parcial de modificação k_{mod3} leva em consideração a categoria da madeira (01ª ou 02ª categoria). Em casos em que a madeira seja de primeira categoria, considera-se $k_{mod3} = 1,0$ e em casos em que a madeira seja de segunda categoria, $k_{mod3} = 0,8$.

Para as madeiras coníferas que serão utilizadas na forma de peças estruturais maciças de madeira serrada, o valor de k_{mod3} deve ser tomado como 0,8, considerando o risco da presença de nós de madeira não detectáveis pela inspeção visual.

Para a avaliação da qualidade da madeira, são utilizados o método do visual normalizado e a avaliação mecânica, em conjunto. Ressalta-se que a NBR 7190/1997 não

referencia tal método, trazendo valores aproximados, sendo que somente serão consideradas peças de primeira categoria se:

- Forem classificadas como isentas de defeitos, pelo método visual;
- A classificação mecânica garantir a homogeneidade da rigidez das peças que compõem o lote da madeira a ser empregado.

Ressalta-se que, conforme a normativa, quando não houver a aplicação simultânea da classificação visual e mecânica, as peças serão automaticamente qualificadas como de 2ª categoria.

Para as madeiras laminadas coladas, deve-se levar em consideração a curvatura da peça, conforme a Tabela 3.6 a seguir.

Tabela 3.6- Valores para k_{mod3}	
Curvatura da peça	K_{mod3}
Reta	1,0
Curva	$1 - 2000 \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^2$
t é a espessura das lâminas e r é o menor raio de curvatura das lâminas que compõem a seção transversal existente.	

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 1997.

3.3 ESBELTEZ

De acordo com a NBR 7190/1997, as peças de madeira que, em situações de projeto, são empregadas apenas à compressão simples, devem ser dimensionadas, inicialmente, admitindo uma excentricidade acidental, por conta das imperfeições da peça.

Considera-se, para exigências ao dimensionamento dos elementos estruturais, a esbeltez das peças, obtida pela Equação (3.4).

$$\lambda = \frac{L_o}{i_{\min}} \quad (3.4)$$

em que L_o é o comprimento teórico de referência e i_{min} é o raio de giração mínimo de sua seção transversal.

Para peças engastadas em uma extremidade e livre na outra, toma-se $L_o = 2L$. Para peças em que ambas as extremidades estejam indeslocáveis por flexão, considera-se $L_o = L$, desprezando qualquer redução em virtude da continuidade estrutural da peça. Vale ressaltar que a variável L é o comprimento real da peça.

Ainda, a partir dos valores adquiridos com a esbeltez das peças, a norma classifica-as em curtas, medianamente esbeltas e esbeltas, seguindo os parâmetros da Tabela 3.7 a seguir:

Tabela 3.7- Classificação das peças comprimidas conforme a esbeltez

Esbeltez da peça	Classificação das peças
$\lambda \leq 40$	Curtas
$40 < \lambda \leq 80$	Medianamente esbeltas
$80 < \lambda \leq 140$	Esbeltas

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 1997.

3.4 ESFORÇOS RESISTENTES EM ESTADO LIMITE ÚLTIMO

De acordo com a NBR 7190/1997, nos projetos de estruturas correntes de madeira devem-se considerar diversas ações e cargas, sejam elas permanentes ou variáveis:

- Cargas permanentes (peso próprio da estrutura e peso de partes fixas não estruturais);
- Cargas acidentais verticais, que podem ser em impactos verticais, impactos laterais, forças longitudinais e força centrífuga;
- Vento.

As cargas acidentais verticais, representadas pelos impactos verticais, impactos laterais, forças longitudinais e forças centrífuga, devem ser considerados componentes de apenas 01 ação variável que, quando comparado com a ação do vento, são elementos de naturezas diferentes e com baixa probabilidade de ocorrência simultânea entre ambas ações.

Para uma ação permanente, todas as suas parcelas são ponderadas pelo coeficiente γ_g considerando-se especificamente ações de grande variabilidade, expressas conforme a Tabela 3.8.

Tabela 3.8- Coeficientes para ações permanentes		
Combinações	Para efeitos	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normais	$\gamma_g = 1,4$	$\gamma_g = 0,9$
Especiais ou de construção	$\gamma_g = 1,3$	$\gamma_g = 0,9$
Excepcionais	$\gamma_g = 1,2$	$\gamma_g = 0,9$

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 1997.

Para as ações variáveis, os coeficientes de ponderação γ_Q majoram seus valores representativos, que produzem efeitos desfavoráveis para a segurança da estrutura. Desta forma, a norma explicita que os componentes das ações variáveis que provocam efeitos favoráveis não devem ser considerados nas combinações de cargas. Tal coeficiente deve ser tomado seguindo os valores básicos expressos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9- Coeficientes para ações variáveis	
Combinações	Ações variáveis em geral, incluídas as cargas acidentais móveis
Normais	$\gamma_Q = 1,4$
Especiais ou de construção	$\gamma_Q = 1,2$
Excepcionais	$\gamma_Q = 1,0$

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 1997.

Quando os tipos de combinações não são informados, se torna usual a utilização dos fatores mais desfavoráveis à estrutura e, portanto, os que majoram em maior quantidade os valores das forças. São estes $\gamma_g = 1,4$ e $\gamma_Q = 1,4$, para ações permanentes e ações variáveis, respectivamente.

Para o cálculo da tensão máxima resistente pelas peças de madeira, a normativa define fórmulas diferentes para peças curtas e medianamente esbeltas. Como ditos anteriormente, as classificações são determinadas através dos valores obtidos da esbeltez.

3.4.1 TRAÇÃO

Conforme a NBR 7190/1997, o esforço de tração é o resultado da aplicação de uma força em uma direção perpendicular a seção transversal do elemento em questão. Para o dimensionamento de peças de madeira se faz necessário a determinação da resistência à tração paralela às fibras, encontrada através da Equação (3.5).

$$f_{td} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t0k}}{\gamma_w} \quad (3.5)$$

em que f_{td} é a resistência de projeto a tração paralela às fibras, k_{mod} é o coeficiente de modificação, f_{t0k} é a resistência característica a tração paralela às fibras, γ_w é o coeficiente de ponderação para estados limites decorrentes de tensões de tração paralela às fibras, obtido pelo o valor de $\gamma_{wt} = 1,8$, conforme a NBR 7190/1997.

A normativa permite ainda, na falta de determinação experimental, a utilização de uma caracterização simplificada das resistências de espécies usuais de madeira, a partir de ensaios realizados de compressão paralela às fibras. Desta forma, para obter a resistência característica a tração paralela às fibras, permite-se adotar a relação da Equação (3.6).

$$\frac{f_{c0k}}{f_{t0k}} = 0,77 \quad (3.6)$$

A segurança da estrutura em relação aos estados limites deverá ser garantida seguindo às condições construtivas e obediência das condições analíticas de segurança - Equação (3.7) - de forma simultânea, especificadas na NBR 7190/1997.

$$\sigma_{td} \leq f_{td} \quad (3.7)$$

em que σ_{td} é a solicitação de cálculo da tensão de tração e f_{td} é a resistência de cálculo à tração.

Em peças tracionadas são admitidos apenas solicitações de tração simples, desconsiderando-se eventuais efeitos de flexão. Para a determinação da resistência de tração em tais peças, seguem-se as Equações (3.8), (3.9) e (3.10).

$$N_d = N_k \cdot \gamma_g \quad (3.8)$$

$$\sigma_{t0d} = \frac{N_d}{A} \quad (3.9)$$

$$N_{td} = f_{t0d} \cdot A \quad (3.10)$$

em que N_{td} é a força de projeto de ruptura à tração, f_{t0d} é a resistência de projeto a tração paralela às fibras e A é a área da seção transversal da peça.

3.4.2 COMPRESSÃO

Conforme a NBR 7190/1997, a compressão é o resultado da aplicação de uma força compressiva a um material, resultando na diminuição de seus vazios e , portanto, redução de seu volume. Para o dimensionamento de peças de madeira se traz necessário a determinação da resistência à compressão paralela às fibras, podendo ser encontrada pela Equação (3.11).

$$f_{c0d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0k}}{\gamma_w} \quad (3.11)$$

em que f_{c0d} é a resistência de projeto a compressão paralela às fibras, k_{mod} é o coeficiente de modificação, f_{c0k} é a resistência característica a compressão paralela às fibras, γ_w é o coeficiente de ponderação para estados limites decorrentes de tensões de compressão paralela às fibras, obtendo o valor básico de $\gamma_{wc} = 1,4$.

3.4.2.1 Compressão em peças curtas

Nas barras curtas comprimidas axialmente, a condição de segurança é expressa pela Equação (3.12):

$$\sigma_{cd} \leq f_{cd} \quad (3.12)$$

em que σ_{cd} é a solicitação de cálculo da tensão de compressão e f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão.

Em peças curtas, cuja esbeltez seja menor que 40, são admitidos apenas solicitações de compressão simples, dispensando-se a consideração de eventuais efeitos de flexão. Para a determinação da resistência de compressão em tais peças, seguem-se as Equações (3.13), (3.14) e (3.15).

$$N_d = N_k \cdot \gamma_g \quad (3.13)$$

$$\sigma_{c0d} = \frac{N_d}{A} \quad (3.14)$$

$$N_{cd} = f_{c0d} \cdot A \quad (3.15)$$

em que N_{cd} é a força de projeto de ruptura à compressão da peça, f_{c0d} é a tensão normal média na solicitação paralela da peça e A é a área da seção transversal da peça.

3.4.2.2 Compressão em peças medianamente esbeltas

Em peças medianamente esbeltas, cujo valor da esbeltez está entre o intervalo de 40 e 80, em que se admite situações de flexo-compressão com esforços de compressão e momento fletor, é necessário a verificação em relação ao estado limite último de instabilidade, através da teoria de validade experimental. Para essa verificação, a norma exige que seja atendida a seguinte condição, expressa pela Equação (3.16):

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c0d}} \leq 1 \quad (3.16)$$

em que σ_{Nd} é o valor de cálculo da tensão devido a força normal de compressão e σ_{Md} é o valor de cálculo da tensão de compressão devido ao momento fletor (M_d), podendo este último ser encontrado através da Equação (3.17).

$$\sigma_{Md} = \frac{M_d}{W} \quad (3.17)$$

O momento fletor (M_d) utilizado na Equação (3.17) pode ser achado através da Equação (3.18) a seguir:

$$M_d = N_d \cdot e_d \quad (3.18)$$

em que W é o módulo de resistência e e_d a excentricidade de projeto, sendo este último obtido pela fórmula (3.19).

$$e_d = e_1 \cdot \left(\frac{F_e}{F_e - N_d} \right) \quad (3.19)$$

onde e_1 é a excentricidade de primeira ordem, F_e é a carga crítica e N_d é o esforço axial na peça.

A excentricidade de projeto e_d pode ser encontrado através das Equações (3.20), (3.21), (3.22) e (3.23) demonstradas a seguir.

$$e_1 = e_i + e_a \quad (3.20)$$

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} \geq \frac{h}{30} \quad (3.21)$$

$$e_a = \frac{L_o}{300} \geq \frac{h}{30} \quad (3.22)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I}{L_o^2} \quad (3.23)$$

em que e_i é a excentricidade inicial, e_a é a excentricidade acidental, L_o é o comprimento efetivo da peça, I é o momento de inércia da seção transversal e $E_{c0,ef}$ é o módulo de elasticidade paralelamente às fibras. O módulo de elasticidade é dado pela Equação (3.24) a seguir.

$$E_{c0,ef} = k_{\text{mod}1} \cdot k_{\text{mod}2} \cdot k_{\text{mod}3} \cdot E_{c0,m} \quad (3.24)$$

CAPÍTULO 4 DIMENSIONAMENTO PELA NBR 7190 - 1/2022

No ano de 2002, foi iniciado um estudo de revisão da NBR 7190/1997 objetivando a atualização dos critérios de dimensionamento com base em ensaios de novos materiais e ligações, bem como experiências adquiridas focados nos projetos de estruturas de madeira. Tal revisão foi finalizada, no entanto, apenas no ano de 2012, não sendo colocada em vigor, pela necessidade de aprovações, estudos e publicações dos métodos de ensaios.

Ademais, desde a proposta de revisão de 2012, foram iniciados novos estudos, sendo finalizado e colocado em vigor no ano de 2022, com algumas modificações. A NBR 7190-1/2022 estabelece os requisitos gerais de projeto e execução de estruturas de madeira incluindo as estruturas formadas por tesouras planas, paralelas ou não, com ligações pregadas, parafusadas ou executadas com chapas de dentes estampados. Além destes, traz atualizações quanto a madeira engenheirada e estruturas em situações de incêndio.

Desta forma, apresenta-se as principais ações e definições conforme a norma em vigor, com enfoque em peças tracionadas e comprimidas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS MADEIRAS

A definição das propriedades de resistência e rigidez da madeira, geralmente, são atribuídos a lotes homogêneos, isto é, quando o coeficiente de variação da resistência à flexão das peças investigadas (conforme a NBR 7190-4/2022) for inferior a 20%.

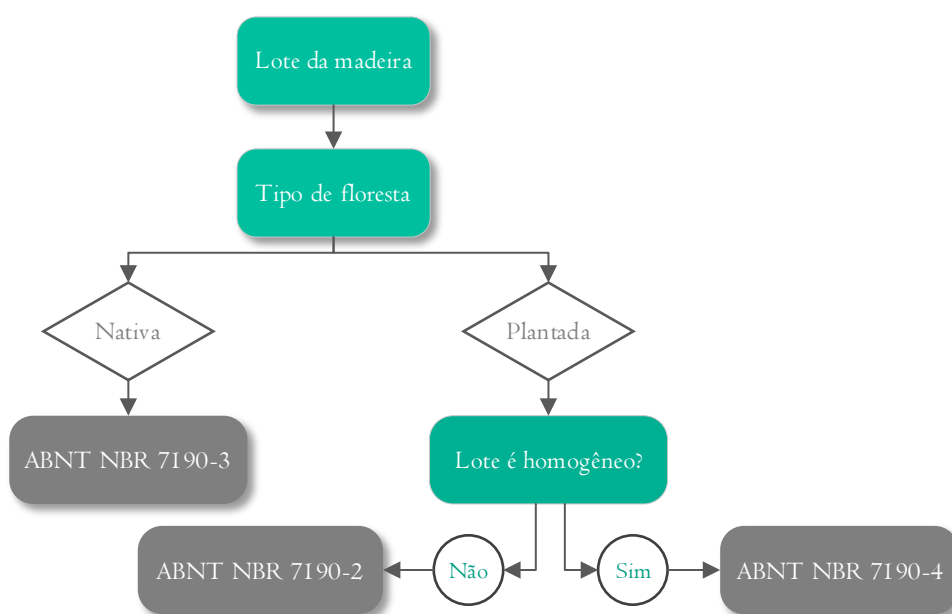
Ainda, a NBR 7190-1/2022 diferencia as madeiras advindas de florestas nativas e florestas plantadas, conforme a Figura 4.1. Para os lotes homogêneos referente às florestas plantadas, deve-se extrair uma amostra constituída de peças estruturais e deve ser ensaiada conforme a NBR 7190-4/2022. A classe de resistência do lote é definida a partir da resistência característica à flexão ($f_{m,k}$) da amostra, para posterior definição dos valores de resistência e rigidez da madeira.

Para os lotes homogêneos advindos de florestas nativas, a norma permite que a amostra seja constituída de corpos de prova isentos de defeitos, ensaiados conforme a

NBR 7190-3/2022. A classe de resistência do lote é definida a partir da resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) da amostra, para posterior definição dos valores de resistência e rigidez da madeira.

Ainda, para os lotes advindos de florestas plantadas cujo tem-se conhecimento consolidado dos efeitos da madeira, mas não há garantia de homogeneidade, deve-se analisar as propriedades de resistência e rigidez de cada peça estrutural, classificando visual e mecanicamente conforme a NBR 7190-2/2022.

Figura 4.1 – Fluxograma de caracterização das propriedades de resistência e rigidez



Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 2022.

4.2 CLASSES DE RESISTÊNCIAS

Para a realização de um projeto de estruturas de madeira, deve ser conhecido a classe de umidade que as peças estão inseridas. As classes de umidade têm por finalidade ajustar as propriedades de resistência e rigidez da madeira, em função das condições ambientais que os elementos permanecerão durante sua vida útil.

As peças de madeira podem enquadrar-se em 4 classes de umidade, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Classes de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente (Uamb)	Umidade de equilíbrio da madeira (Ueq)
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 2022.

As classes de resistência objetivam a utilização de madeiras com propriedades padronizadas, sendo diferenciados em espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos (Tabela 4.2) e espécies de florestas plantadas definidas em ensaios de peças estruturais (Tabela 4.3).

Tabela 4.2- Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos

Classes	f_{c0k} (MPa)	f_{v0k} (MPa)	$E_{c0,med}$ (MPa)	Densidade a 12% kg/m^3
D20	20	4	10000	500
D30	30	5	12000	625
D40	40	6	14500	750
D50	50	7	16500	850
D60	60	8	19500	1000

NOTA 1 Os valores desta Tabela foram obtidos de acordo com a NBR 7190-3/2022.

NOTA 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12%.

NOTA 3 Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na NBR 7190-3/2022, Tabela A.1.

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 2022.

Tabela 4.3- Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais

		Coníferas											Folhosas								
	Símbolo	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência (MPa)																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão Perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Propriedades de rigidez (GPa)																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade a 0° característico	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8
Módulo de elasticidade a 90° médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 2022.

4.3 COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO

O coeficiente de modificação (k_{mod}) serve para alterar os valores característicos das propriedades de resistência da madeira em função da classe de carregamento da estrutura (k_{mod1}) e da classe de umidade admitida (k_{mod2}). Segundo a NBR 7190/2022-1, esse coeficiente pode ser calculado seguindo a Equação (4.1).

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \quad (4.1)$$

4.3.1 Coeficiente de modificação devido à classe de carregamento

O coeficiente parcial de modificação k_{mod1} contempla a classe de carregamento que a peça de madeira está sujeita e o tipo de material empregado, seguindo a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores para k_{mod1}				
Classes de Carregamento	Ação variável principal da combinação		Tipos de madeira	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica	Madeira serrada, Madeira roliça, madeira lamelada colada, Madeira lamelada colada cruzada, Madeira laminada colada	Madeira recomposta
Permanente	Permanente	Mais de dez anos	0,60	0,30
Longa duração	Longa duração	Seis meses a dez anos	0,70	0,45
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses	0,80	0,65
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana	0,90	0,90
Instantânea	Instantânea	Muito curta	1,10	1,10

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 2022.

4.3.2 Coeficiente de modificação devido à classe de umidade e material

O coeficiente parcial de modificação k_{mod2} leva em consideração a classe de umidade e o tipo de material empregado, exposto na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores para k_{mod2}		
Classes de umidade	Madeira serrada, Madeira roliça, madeira lamelada colada, Madeira lamelada colada cruzada, Madeira laminada colada	Madeira recomposta
(1)	1,00	1,00
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70	0,90
Não é permitido o uso da madeira lamelada colada cruzada para a classe de umidade (4)		

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 2022.

4.4 ESTADO LIMITE ÚLTIMO

4.4.1 Valores de cálculo da resistência

O cálculo da resistência é realizado através da Equação (4.2) abaixo:

$$f_{wd} = k_{mod} \cdot \frac{f_{wk}}{\gamma_w} \quad (4.2)$$

em que f_{wd} é a resistência de projeto a tração ou compressão paralela às fibras, k_{mod} é o coeficiente de modificação, f_{wk} é a resistência característica a tração ou compressão paralela às fibras, γ_w é o coeficiente de ponderação para estados limites decorrentes de tensões normais.

A normativa em vigor permite que o coeficiente de minoração γ_w para estados-limite últimos decorrentes de tensões normais (tração e compressão) possua o valor básico de $\gamma_w=1,4$.

4.4.2 Esforços resistentes

Os esforços resistentes das peças estruturais de madeira devem ser determinados considerando comportamento elastofrágil do material. Ou seja, um diagrama tensão deformação linear até a ruptura em compressão e tração paralela às fibras.

Considerando-se a utilização da Tabela 4.2, o valor de cálculo da resistência à tração paralela às fibras pode ser igual ao valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras:

$$f_{td} = f_{cd} \quad (4.3)$$

Para as madeiras classificadas através de ensaios em peças estruturais, o valor característico à tração deve ser obtido pela Tabela 4.3.

4.4.3 Solicitações normais

4.4.3.1 Tração paralela às fibras

Para as barras tracionadas axialmente, a condição de segurança demonstrada na Equação (4.4) deve ser satisfeita.

$$\sigma_{Ntd} = \frac{N_{td}}{A} \leq f_{td} \quad (4.4)$$

em que σ_{Ntd} é o valor de cálculo da tensão devido a força normal de tração, N_{td} é o valor de cálculo da força normal, A é a área da seção transversal da peça e f_{td} é a resistência de cálculo à tração paralela às fibras.

4.4.3.2 Compressão paralela às fibras

A condição de segurança relativa à resistência à compressão axial que deve ser satisfeita é expressa na Equação (4.5).

$$\sigma_{Ncd} = \frac{N_{cd}}{A} \leq f_{c0d} \quad (4.5)$$

em que σ_{Ncd} é o valor de cálculo da tensão devido a força normal de compressão, N_{cd} é o valor de cálculo da força normal, A é a área da seção transversal da peça e f_{c0d} é a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras.

4.4.3.2.1 Condição de estabilidade

Além da condição de segurança mostrada na Equação (4.5), as peças de madeira em que os índices de esbeltez relativa (λ_{rel}), em qualquer direção, sejam superiores à 0,3, devem satisfazer as condições de estabilidade, mostradas nas Equações (4.6) e (4.7).

$$\frac{\sigma_{Ncd}}{k_{cx} \cdot f_{c0d}} + \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{md}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Myd}}{f_{md}} \leq 1 \quad (4.6)$$

$$\frac{\sigma_{Ncd}}{k_{cy} \cdot f_{c0d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{md}} + \frac{\sigma_{Myd}}{f_{md}} \leq 1 \quad (4.7)$$

em que σ_{Ncd} é o valor de cálculo da tensão devido a força normal de compressão, k_{cx} e k_{cy} são os coeficientes de correção para compressão, f_{c0d} é a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras, k_M é o coeficiente de correção para flexão, σ_{Mxd} e σ_{Myd} são as tensões máximas de cálculo devido às componentes de flexão atuantes e f_{md} é a resistência de cálculo na flexão. Estas variáveis encontram-se detalhadas nos próximos itens.

4.4.3.2.2 Esbeltez

Os requisitos de dimensionamento das peças comprimidas dependem do valor da esbeltez, definida pela Equação (4.8) a seguir:

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I}{A}}} \quad (4.8)$$

em que λ é o índice de esbeltez na direção analisada, L_0 é o comprimento de flambagem, I é o momento de inércia na direção analisada e A é a área da seção transversal.

Vale ressaltar que para peças comprimidas, o índice de esbeltez não pode superar o valor de 140.

O comprimento de flambagem L_0 depende das condições de vinculação das extremidades das barras, definidos pelo coeficiente K_e (Tabela 4.6) e comprimento da peça analisada (Equação (4.9)).

$$L_0 = K_E \cdot L \quad (4.9)$$

Tabela 4.6 - Valores dos coeficientes K_E

Modos de Flambagem						
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Código das condições de extremidade						
	Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre					
	Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida					
	Rotação livre e translações impedidas					
	Rotação impedida e translações livres					
	Rotação e translações livres					

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 2022.

4.4.3.2.3 Esbeltez relativa

Os índices de esbeltez relativa nas direções x e y são definidos pelas Equações (4.10) e (4.11):

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0k}}{E_{0,05}}} \quad (4.10)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0k}}{E_{0,05}}} \quad (4.11)$$

em que $\lambda_{rel,x}$ e $\lambda_{rel,y}$ são os índices de esbeltez relativa correspondentes à flexão em relação à x e y, λ_x e λ_y são os índices de esbeltez dos eixos x e y, f_{c0k} é a resistência

característica a compressão paralela às fibras e $E_{0,05}$ é o valor característico do módulo de elasticidade medidos na direção paralela às fibras.

O módulo de elasticidade característico ($E_{0,05}$), para peças de madeira enquadradas na Tabela 4.2, pode ser encontrado através da Equação (4.12) a seguir:

$$E_{0,05} = 0,7 \cdot E_{c0,med} \quad (4.12)$$

Para peças de madeira em que as classes de resistência são definidas através de ensaios, o valor de $E_{0,05}$ pode ser encontrado diretamente na Tabela 4.3.

Para $\lambda_{rel,x}$ e $\lambda_{rel,y}$ com valores inferiores à 0,3, as tensões devem satisfazer apenas as condições de segurança apresentadas no item 4.4.3.2, sem a necessidade de verificação de estabilidade.

4.4.3.2.4 Coeficientes de correção

Os coeficientes k_{cx} e k_{cy} utilizados nas condições de estabilidade podem ser calculados seguindo as Equações (4.13) e (4.14):

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x^2) - (\lambda_{rel,x}^2)}} \quad (4.13)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y^2) - (\lambda_{rel,y}^2)}} \quad (4.14)$$

em que os coeficientes k_x e k_y podem ser encontrados pelas Equações (4.15) e (4.16) a seguir:

$$k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2] \quad (4.15)$$

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2] \quad (4.16)$$

Ressalta-se que, o fator para peças estruturais que atendem aos limites de divergência de alinhamento (β_c) são definidos a partir da espécie da madeira, conforme a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valores do fator β_c	
Tipo de madeira	β_c
Madeira serrada	0,2
Madeira roliça	0,2
Madeira lamelada colada	0,1
Madeira lamelada colada cruzada	0,1
Madeira laminada colada	0,1

Fonte: ADAPTADO DA ABNT, 2022.

4.5 COMPARAÇÕES ENTRE NORMAS

Conforme manifestado anteriormente, a NBR 7190 foi atualizada no ano de 2022, perdurando um total de 25 anos em que a edição de 1997 permaneceu em vigor.

Inicialmente, para o dimensionamento de peças de madeira, ambas normativas trazem classificações dos elementos que padronizam suas propriedades, denominados classes de resistências. A revisão de 1997 subdivide as peças em Coníferas e Dicotiledôneas, sendo 03 e 04 classes de resistências, respectivamente. Já na revisão atual, a padronização de elementos se dá através da verificação de sua origem, sejam eles advindos de florestas nativas – fragmentados em 5 classes – ou florestas plantadas. Ainda, para lotes de florestas plantadas, a normativa traz uma subdivisão entre Coníferas e Folhosas, distribuídos em 12 e 08 classes de resistência, respectivamente. É importante ressaltar que tais acréscimos permitem melhores encaixes em situações práticas.

Referente ao coeficiente de modificação, a edição de 1997 definia que os valores de cálculo relacionados às propriedades da madeira deveriam ser minorados devido às interferências da classe de carregamento, classe de umidade e qualidade do material. Considerando-se de conhecimento a origem da peça de madeira, a revisão de 2022 retira o terceiro coeficiente de modificação (qualidade do material), permanecendo com valores iguais para o carregamento e alterando os valores para a 2º e 4º classe de umidade.

Na edição antiga, as peças submetidas à compressão deviam ser classificadas entre curtas, medianamente esbeltas e esbeltas, por meio da avaliação da sua esbeltez. Tais

classificações eram necessárias pois diferenciavam-se os métodos e equações para estados de limites último, especificadamente em relação às condições adicionais de segurança. Na edição atual, para o esforço de compressão paralela às fibras, deve-se satisfazer a condição de estabilidade caso os índices de esbeltez relativa sejam superiores à 0,3.

Salienta-se que, o coeficiente de ponderação para estados limites decorrentes de tensões normais (γ_w) era distinto para peças submetida à esforços de tração e compressão, com valores de 1,8 e 1,4 respectivamente. No entanto, pela normativa em vigor, foi considerado o valor fixo de 1,4 para ambos esforços.

CAPÍTULO 5 O SOFTWARE

Neste capítulo apresenta-se a lógica de programação utilizada na concepção do *software*, tanto para a verificação de peças de madeira submetidas à tração, quanto para compressão paralela às fibras, seja pelas normativas NBR 7190/1997 e NBR 7190/2022, juntamente com destaques do código realizado.

5.1 LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO PELA NBR 7190/1997

O código de programação possui o intuito de fazer a verificação do tipo de madeira informado pelo usuário, referente à tração e compressão paralela às fibras da madeira.

Inicialmente, o código indaga sobre qual normativa o usuário pretende verificar: NBR 7190/1997 ou NBR 7190/2022. Selecionando-se primeiramente a de 1997, o código indaga sobre o tipo de ação exercido na madeira, sendo as opções “Tração” ou “Compressão”. Caso o usuário escolha a opção “Tração”, o código seguirá pela linha desenvolvida por Silva (2021), com algumas leves alterações para evidenciar a verificação das peças. Caso o usuário selecione a opção “Compressão”, o código seguirá pela linha desenvolvida nesta pesquisa, seguido pela pergunta se é de conhecimento do usuário o valor da resistência à compressão paralela às fibras. Caso a resposta seja afirmativa, solicita-se o valor conhecido e caso seja negativa, solicita-se a espécie e a classe de resistência da madeira. A Figura 5.1 expõe a parte inicial do funcionamento do *software*.

Figura 5.1 – Entrada de dados (resistência à compressão)

```
VERIFICAÇÃO DE ESFORÇOS NA MADEIRA

Qual normativa você pretende utilizar?
(1) NBR 7190/1997      (2) NBR 7190/2022
1
Qual o tipo de ação exercida na madeira?
(1) Tração            (2) Compressão
2
Você escolheu verificação à COMPRESSÃO!
Por favor, todos os dados a serem informados devem possuir o PONTO como separador decimal.

Você saberia informar o valor da resistência à compressão paralela às fibras
e valor médio do módulo de elasticidade?
(1) Sim              (2) Não
2
Então, vamos escolher uma classe de resistência!
Você pretende trabalhar com CONÍFERA ou DICOTILEDÔNEA?
(1) Coníferas       (2) Dicotiledôneas
1
Dentre as opções abaixo, qual classe de resistência te atende?
(1) C20      (2) C25      (3) C30
2
```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Após as informações sobre a resistência inseridas, o código solicita o valor do coeficiente de modificação (K_{mod}). Caso o usuário indique que conhece tal valor, ele deve ser informado. Caso não seja conhecido o valor, o usuário deve informar o tipo da madeira, a classe de carregamento, a classe de umidade e a categoria da madeira, para que sejam encontrados os valores de K_{mod1} , K_{mod2} , K_{mod3} e consequentemente, K_{mod} (determinado no item 3.2). A Figura 5.2 demonstra a próxima parte do funcionamento do programa, atribuindo o desconhecimento do K_{mod} .

Figura 5.2 – Entrada de dados (coeficiente de modificação)

```
Você saberia informar o valor do coeficiente de modificação?
  (1) Sim   (2) Não
2
Então vamos determinar o coeficiente de modificação!
Qual o tipo de madeira utilizada?
  (1) Serrada, laminada colada ou compensada   (2) Recompоста
1
Dentre as opções abaixo, qual a classe de carregamento te atenderia?
  (1) Permanente
  (2) Longa duração
  (3) Média duração
  (4) Curta duração
  (5) Instantânea
2
Dentre as opções abaixo, qual a classe de umidade da madeira?
  (1) Menor ou igual a 65%
  (2) Entre 65,1% e 75%
  (3) Entre 75,1% e 85%
  (4) Maior que 85%
2
Dentre as opções abaixo, qual a categoria da madeira?
  (1) 1ª categoria   (2) 2ª categoria
2
```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Posteriormente, é informado a resistência de cálculo à tração ou compressão paralela às fibras e logo após, é solicitado o comprimento da peça em questão juntamente com sua configuração de apoio (caso selecionado esforço de compressão), o tipo de seção transversal e suas dimensões (para que seja calculado as propriedades geométricas). O código limita-se às seções retangulares, quadradas e circulares (demonstrado na quarta linha da Figura 5.3), finalizando o *software* caso nenhum desses seja identificado.

Salienta-se que, após o cálculo das propriedades geométricas, o código expõe se o elemento é curto, medianamente esbelto ou esbelto. Caso a peça seja esbelta, o *software* é finalizado após exibir uma mensagem ao usuário que tal peça não pode ser calculada por este. A Figura 5.3 expressa a solicitação das medidas e a classificação referente à

esbeltez. Ressalta-se que, para as seções circulares e quadradas, a esbeltez em x é igual a esbeltez em y . Já em seções retangulares, tais valores se diferenciam, devendo serem dimensionadas separadamente.

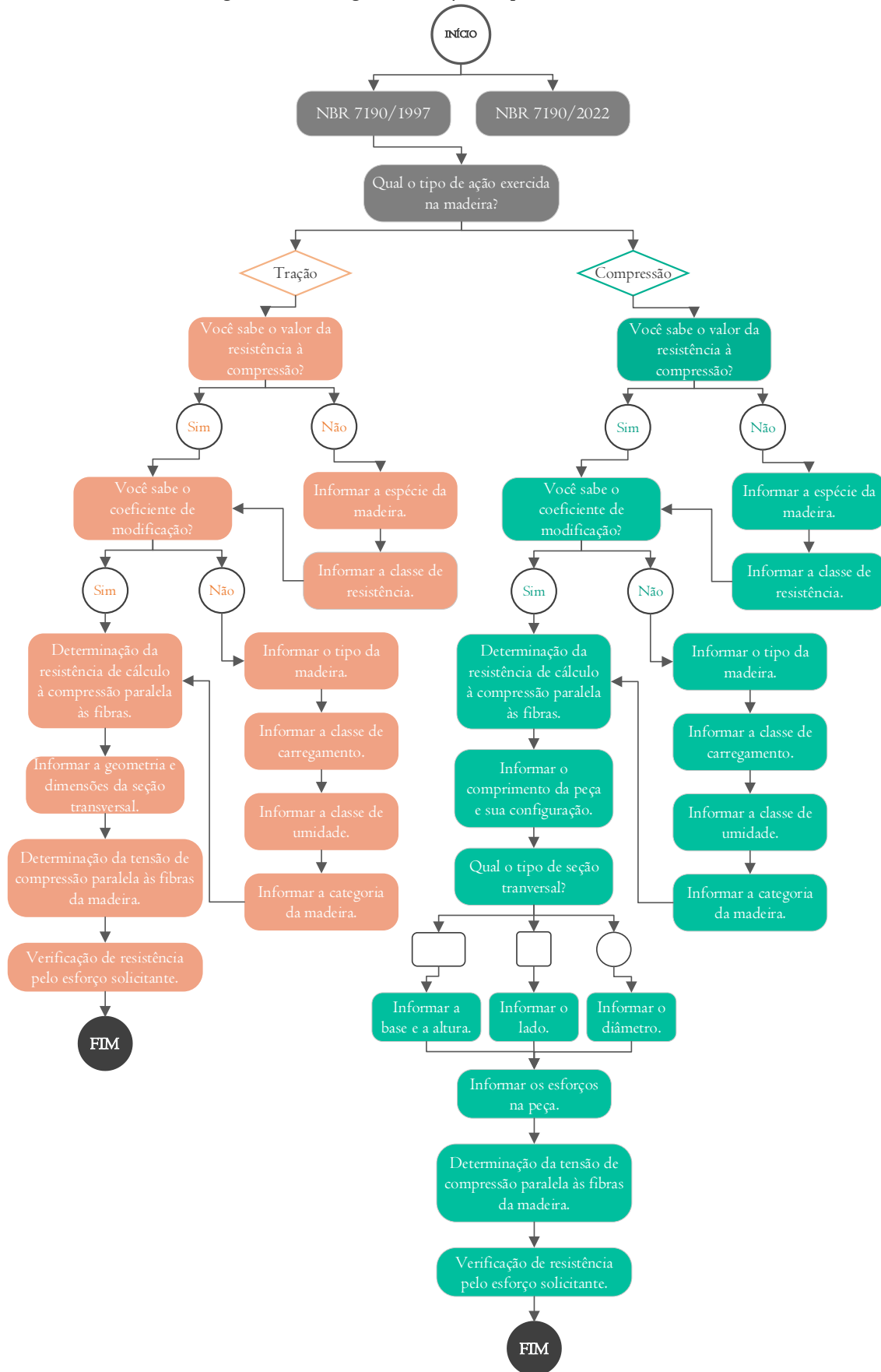
Figura 5.3 - Cálculo da esbeltez

```
Informe o comprimento da peça: (em metros)
2.45
A peça é engastada em uma extremidade e livre na outra?
(1) Sim (2) Não
2
Dentre as opções abaixo, qual é o tipo da seção transversal?
(1) Circular (2) Quadrada (3) Retangular
3
Informe a medida da base da seção transversal da peça: (em metros)
0.3
Informe a medida da altura da seção transversal da peça: (em metros)
0.2
A peça é medianamente esbelta em x.
```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Em seguida, o código deverá solicitar ao usuário os esforços solicitantes, em Newtons, em que a peça esteja submetida. Com todas as informações necessárias, o código calculará a determinação da tensão de compressão paralela às fibras solicitante, e promoverá a verificação se a peça em questão resiste ao esforço informado ou não. Para melhor demonstração, a Figura 5.4 expõe o fluxograma do *software*. Ressalta-se que o programa segue em laranja caso o usuário escolha a verificação em tração - adaptado do *software* da Silva (2021) - e em verde caso a escolha prosseguir em compressão paralela às fibras.

Figura 5.4- Fluxograma do *software* pela NBR 7190/1997



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

5.2 LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO PELA NBR 7190/2022

Inicialmente, o código realiza uma pergunta referente à qual normativa o usuário pretende verificar: NBR 7190/1997 ou NBR 7190/2022. Selecionando-se agora a norma vigente de 2022, o código realiza uma pergunta para o tipo de ação exercido na madeira, sendo as opções “Tração” ou “Compressão”. Em ambas opções, o código seguirá pela linha desenvolvida nesta pesquisa, seguido pela pergunta do local de origem da madeira utilizada, com as opções de “Floresta nativa” e “Floresta Plantada”. Selecionada alguma das opções de origem, o programa realiza a pergunta se é de conhecimento do usuário o valor da resistência característica paralela às fibras e do módulo de elasticidade a 0º característico. Caso a resposta seja afirmativa, solicita-se os valores conhecidos e caso seja negativa, solicita-se a espécie e a classe de resistência da madeira. A Figura 5.5 expõe a parte inicial do funcionamento do *software*.

Figura 5.5 – Entrada de dados (resistência à compressão)

```
VERIFICAÇÃO DE ESFORÇOS NA MADEIRA

Qual normativa você pretende utilizar?
  (1) NBR 7190/1997      (2) NBR 7190/2022
2

Qual o tipo de ação exercida na madeira?
  (1) Tração            (2) Compressão
2
Você escolheu verificação à COMPRESSÃO!

Por favor, todos os dados a serem informados devem possuir o PONTO como separador decimal.

Qual o tipo de floresta que a peça veio?
  (1) Floresta nativa   (2) Floresta plantada
2
Você saberia informar o valor da resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira?
  (1) Sim              (2) Não
2
Então vamos escolher uma classe de resistência!

Você pretende trabalhar com CONÍFERA ou FOLHOSA?
  (1) Coníferas        (2) Folhosas
2
Dentre as opções abaixo, qual classe de resistência te atende?
  (1) D18   (2) D24   (3) D30   (4) D35   (5) D40   (6) D50   (7) D60   (8) D70
4
```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Após as informações sobre a resistência inseridas, o código solicita o valor do coeficiente de modificação (K_{mod}). Caso o usuário indique que conhece tal valor, ele deve ser informado. Caso não seja conhecido o valor, o usuário deve informar o tipo da madeira, a classe de carregamento e a classe de umidade, para que sejam encontrados os valores de K_{mod1} e K_{mod2} e consequentemente, K_{mod} (determinado no item 4.3). A Figura 5.6 demonstra a próxima parte do funcionamento do programa, atribuindo o desconhecimento do K_{mod} .

Figura 5.6 – Entrada de dados (coeficiente de modificação)

```

Você saberia informar o valor do coeficiente de modificação?
(1) Sim (2) Não
2
Então vamos determinar o coeficiente de modificação!

Qual o tipo de madeira utilizada?
(1) Serrada, roliça, lamelada colada, lamelada colada cruzada ou laminada colada (2) Recompоста
1
Dentre as opções abaixo, qual a classe de carregamento te atenderia?
(1) Permanente
(2) Longa duração
(3) Média duração
(4) Curta duração
(5) Instantânea
2
Dentre as opções abaixo, qual a classe de umidade da madeira?
(1) Menor ou igual a 65%
(2) Entre 65,1% e 75%
(3) Entre 75,1% e 85%
(4) Maior que 85%
2

```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Posteriormente, é informado a resistência de cálculo à tração ou compressão paralela às fibras e logo após, é solicitado o comprimento da peça em questão juntamente com sua configuração de apoio (caso selecionado esforço de compressão), o tipo de seção transversal e suas dimensões (para que seja calculado as propriedades geométricas), conforme a Figura 5.7. O código limita-se às seções retangulares, quadradas e circulares, finalizando o *software* caso nenhum desses seja identificado.

Figura 5.7 – Entrada de dados referente à geometria

```

A resistência de cálculo à compressão paralela às fibras da madeira é de 11.25 MPa

Informe o comprimento da peça: (em metros)
3
Qual a configuração da peça analisada?
(1) Engastados em ambas extremidades
(2) Engastado em uma extremidade e apoiado em outra
(3) Engastado em uma extremidade e translações livres em outra
(4) Apoiados em ambas extremidades
(5) Engastado em uma extremidade e rotulado em outra
(6) Apoiado em uma extremidade e translações livres em outra
4
Dentre as opções abaixo, qual é o tipo da seção transversal?
(1) Circular (2) Quadrada (3) Retangular
3
Informe a medida da base da seção transversal da peça: (em metros)
0.2
Informe a medida da altura da seção transversal da peça: (em metros)
0.3

```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Em seguida, o código deverá solicitar ao usuário os esforços solicitantes, em Newtons, em que a peça esteja submetida e expõe se há a necessidade em satisfazer a condição de estabilidade. Caso seja, solicita-se o tipo de madeira. Com todas as informações necessárias, o código calculará a determinação da tensão de tração ou compressão paralela às fibras solicitante nas condições de segurança e estabilidade (caso necessite), e promoverá a verificação se a peça em questão resiste ao esforço informado

ou não. Além disso, é informado a máxima força resistida pela peça de madeira, conforme demonstrado pela Figura 5.8.

Figura 5.8 - Cálculos fornecidos pelo *software*

```
Qual o esforço de compressão exercido nas extremidades da barra? (em Newtons)
150000
A peça necessita satisfazer a condição de estabilidade em x e y.

Qual o tipo de madeira utilizada?
(1) Serrada ou roliça (2) Lamelada colada, lamelada colada cruzada ou laminada colada
1
Conforme a NBR 7190/2022, a peça de madeira RESISTE ao esforço solicitante na condição de estabilidade em ambas direções
!

Conforme a NBR 7190/2022, a peça de madeira RESISTE ao esforço solicitante na condição de segurança!

A máxima força resistida pela peça é de 630.7196507005676 kN.
```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Para melhor demonstração, a Figura 5.9 expõe o fluxograma do *software*. Ressalta-se que o programa segue em laranja caso o usuário escolha a verificação em tração e em verde caso a escolha segue prosseguir em compressão paralela às fibras.

Figura 5.9 - Fluxograma do software pela NBR 7190/2022



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

CAPÍTULO 6 ENSAIOS NUMÉRICOS

Os ensaios numéricos objetivam testar o funcionamento do software, a fim de verificar os valores de cálculos fornecidos, bem como os ensaios inseridos no programa realizado.

6.1 ENSAIO DE VERIFICAÇÃO À TRAÇÃO PELA NBR 7190/1997

Busca-se determinar a resistência à tração paralela às fibras e a resistência de ruptura por tração de uma peça de madeira serrada, dicotiledônia de segunda categoria que será instalada em um ambiente com classe de umidade de 2. Deve-se considerar que o carregamento é de longa duração, pertencente a classe C40, com seção transversal retangular de 20 x 30 centímetros e comprimento de 3 metros.

Analizando a Tabela 3.3, que dispõe os valores para as dicotiledôneas, para a classe de resistência C40, a resistência característica à compressão paralela às fibras (f_{ck}) é de 40 MPa, a resistência ao cisalhamento paralela as fibras (f_{vk}) de 6 MPa, o valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela as fibras ($E_{c0,m}$) é de 19500 MPa e, densidade básica ($\rho_{bas,m}$) de 750 kg/m³ e densidade aparente da madeira ($\rho_{aparente}$) de 950 kg/m³.

Para a determinação da resistência de projeto à tração paralela às fibras, deve-se inicialmente calcular a resistência característica a tração. A normativa define que a resistência à compressão seja 77% da resistência à tração - Equação (3.6) -, sendo assim f_{tdk} no valor de 51,948 MPa. De forma complementar, deve-se calcular o coeficiente de modificação (k_{mod}). O coeficiente parcial 01, relativo à classe de carregamento de longa duração, é no valor de 0,70. O coeficiente parcial 02, referente à classe de umidade 2, o valor é de 1,0 e o coeficiente parcial 03, relativo à 2ª categoria da madeira, o valor é de 0,80. Desta forma, o coeficiente de modificação k_{mod} encontrado com a multiplicação dos três coeficientes parciais, é de 0,56, conforme Equação (6.1).

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} = 0,70 \cdot 1,0 \cdot 0,80 = 0,56 \quad (6.1)$$

Com todos os valores conhecidos (f_{t0k} e k_{mod}), e considerando o coeficiente de minoração no valor de 1,8 para tração, pode-se encontrar a resistência de projeto (f_{td}), correspondente a 16,16 MPa.

$$f_{td} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t0k}}{\gamma_w} = 0,56 \cdot \frac{51,948}{1,8} = 16,16 MPa \quad (6.2)$$

Por fim, para o cálculo da resistência à ruptura, deve-se encontrar a área da seção transversal da peça, obtido no valor de 600 cm² ou 0,06 m². Assim, basta aplicar a Equação (3.10) , encontrando o valor de 969,6 kN.

$$N_{td} = f_{td} \cdot A = 16,16 \cdot 0,06 = 969,6 kN \quad (6.3)$$

Aplicando os mesmos dados do ensaio acima no *software* realizado, tem-se o relatório de cálculo demonstrado nas figuras Figura 6.1 e Figura 6.2. É importante ressaltar que foram encontrados os mesmos valores, pelo ensaio manual e pelo programa, demonstrando a exatidão e eficácia do *software*.

Figura 6.1 – Página 1 do relatório de cálculo para o ensaio 01

File - app2

```

1 C:\Users\dairl\AppData\Local\Programs\Python\Python310\python.exe "H:/Meu Drive/TCC/
sSOFTWARE_01/app.py"
2 VERIFICAÇÃO DE ESFORÇOS NA MADEIRA
3
4 Qual normativa você pretende utilizar?
5 (1) NBR 7190/1997 (2) NBR 7190/2022
6 1
7 Qual o tipo de ação exercida na madeira?
8 (1) Tração (2) Compressão
9 1
10 Você escolheu verificação à TRAÇÃO!
11 Por favor, todos os dados a serem informados devem possuir o PONTO como separador decimal.
12
13 Você saberia informar o valor da resistência à tração paralela às fibras da madeira?
14 (1) Sim (2) Não
15 2
16 Você saberia informar o valor da resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira?
17 (1) Sim (2) Não
18 2
19 Então, vamos escolher uma classe de resistência!
20
21 Você pretende trabalhar com CONÍFERA ou DICOTILEDÔNEA?
22 (1) Coníferas (2) Dicotiledôneas
23 2
24 Dentre as opções abaixo, qual classe de resistência te atende?
25 (1) C20 (2) C30 (3) C40 (4) C60
26 3
27 Você saberia informar o valor do coeficiente de modificação?
28 (1) Sim (2) Não
29 2
30 Então vamos determinar o coeficiente de modificação!
31
32 Dentre as opções abaixo, qual a classe de carregamento te atenderia?
33 (1) Permanente
34 (2) Longa duração
35 (3) Média duração
36 (4) Curta duração
37 (5) Instantânea
38 2
39 Dentre as opções abaixo, qual a classe de umidade do ambiente?
40 (1) Menor ou igual a 65%
41 (2) Entre 65,1% e 75%
42 (3) Entre 75,1% e 85%
43 (4) Maior que 85%
44 2
45 Dentre as opções abaixo, qual a categoria da madeira?
46 (1) 1ª categoria (2) 2ª categoria
47 2
48 A resistência de cálculo à tração paralela às fibras da madeira é de 16.161616161616 MPa
49
50 Dentre as opções abaixo, qual é o tipo da seção transversal?
51 (1) Circular (2) Quadrada ou Retangular
52 2
53 Informe a medida da base da seção transversal da peça: (em metros)
54 0.2
55 Informe a medida da altura da seção transversal da peça: (em metros)
56 0.3
57 Qual o esforço exercido nas extremidades da barra? (em Newton)
58 150000
59 A tensão de tração paralela às fibras da madeira é de 2.5 MPa
60

```

Page 1 of 2

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Figura 6.2 - Página 2 do relatório de cálculo para o ensaio 01

File - app2

```
61 Conforme a NBR 7190/1997, a peça de madeira RESISTE ao esforço solicitante!  
62  
63 A máxima força resistida pela peça é de 969.6969696969695 kN!  
64  
65 Process finished with exit code 0  
66
```

6.2 ENSAIO DE VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO PELA NBR 7190/1997

Busca-se calcular a resistência à compressão de um pilar de madeira serrada de segunda categoria, sabendo que a peça analisada é uma conífera, de classe C30, com seção 20 x 20 centímetros e altura de 4 metros. Deve-se considerar a classe de umidade 3 e carregamento de longa duração. Ainda, deve-se verificar se a peça em questão suporta uma força axial de projeto de 150 kN.

Analizando a Tabela 3.2, que dispõe dos valores de resistência para coníferas, verifica-se que, para a classe C30, a resistência característica à compressão paralela às fibras (f_{c0k}) é de 30 MPa, a resistência ao cisalhamento paralela as fibras (f_{vk}) de 6 MPa, o valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela as fibras ($E_{c0,m}$) é de 14500 MPa, a densidade básica ($\rho_{bas,m}$) é de 500 kg/m³ e a densidade aparente da madeira ($\rho_{aparente}$) é de 600 kg/m³.

Para a determinação da resistência de projeto à compressão paralela às fibras, deve-se calcular o coeficiente de modificação (k_{mod}). O coeficiente parcial 01, relativo à classe de carregamento de longa duração, é no valor de 0,70. O coeficiente parcial 02, referente à classe de umidade 3, o valor é de 0,80 e o coeficiente parcial 03, relativo à 2ª categoria da madeira é de 0,80. Desta forma, o coeficiente de modificação k_{mod} encontrado com a multiplicação dos três coeficientes parciais, é de 0,448, conforme Equação (6.4).

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} = 0,70 \cdot 0,80 \cdot 0,80 = 0,448 \quad (6.4)$$

Com todos os valores conhecidos (f_{c0k} e k_{mod}), e considerando o coeficiente de minoração no valor de 1,4 para compressão, pode-se encontrar a resistência de projeto (f_{c0d}), correspondente a 9,6 MPa.

$$f_{c0d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0k}}{\gamma_w} = 0,448 \cdot \frac{30}{1,4} = 9,6 MPa \quad (6.5)$$

Para encontrar a solicitação em que a peça está submetida, deve-se inicialmente verificar se ela se enquadra como elemento curto, medianamente esbelto ou esbelto. Para

isso, torna-se necessário a aplicação da esbeltez e posterior verificação das condições de segurança. Para a seção dada de 20 x 20 cm, tem-se uma área de 400 cm². Para o momento de inércia na direção de x e y, tem-se o valor de 13333,33 cm⁴ para ambas as direções. Desta forma, o índice de esbeltez é de 69,282. Como tal valor encontra-se entre 40 e 80, a peça é considerada medianamente esbelta em x e y.

$$I_x = I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{20 \cdot 20^3}{12} = 13333,33 \text{ cm}^4 \quad (6.6)$$

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{400}{\sqrt{\frac{13333,33}{400}}} = 69,282 \quad (6.7)$$

Para a determinação das tensões de compressão devido às forças normais e de momentos fletores, deve-se primordialmente calcular o módulo de resistência (W) nas direções x e y. Como as dimensões da seção transversal da peça são iguais, o módulo de resistência em ambas direções se igualam, resultando no valor de 1333,33 cm³. A tensão devido a força normal, obtido pela relação entre a força axial de projeto e a área, é de 3750 MPa.

$$W_x = W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{20 \cdot 20^2}{6} = 1333,33 \text{ cm}^3 \quad (6.8)$$

$$\sigma_{Nd} = \frac{N_d}{A} = \frac{150}{0,04} = 3750 \text{ kPa} \quad (6.9)$$

Para a obtenção da tensão de resistência à compressão devido ao momento fletor, devem ser calculados o módulo de elasticidade efetivo, a carga crítica, a excentricidade de 1ª ordem, a excentricidade de projeto e o momento fletor. Os valores encontrados, respectivamente, são 6496 MPa, 534,3 kN, 2 cm, 2,78 cm, 4170 N.m e por fim, a tensão de resistência no valor de 3127,51 kN/m².

$$E_{c0,ef} = k_{mod} \cdot E_{c0,m} = 0,448 \cdot 14500 = 6496 MPa \quad (6.10)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I}{L_0^2} = \frac{\pi^2 \cdot 6496 \cdot 13333,33 \cdot 10^{-8}}{4^2} = 534,3 kN \quad (6.11)$$

$$e_a = \frac{L_0}{300} = 1,333 \geq \frac{h}{30} = 0,667 \quad (6.12)$$

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} = 0 \geq \frac{h}{30} = 0,667 \quad (6.13)$$

$$e_1 = e_i + e_a = 1,333 + 0,667 = 2 \quad (6.14)$$

$$e_d = e_1 \cdot \left(\frac{F_e}{F_e - N_d} \right) = 2 \cdot \left(\frac{534,3}{534,3 - 150} \right) = 2,78 cm \quad (6.15)$$

$$M_d = N_d \cdot e_d = 150 \cdot 0,0278 = 4170 N.m \quad (6.16)$$

$$\sigma_{Md} = \frac{M_d}{W} = \frac{4170}{1333,33 \cdot 10^{-6}} = 3127,51 kPa \quad (6.17)$$

Para satisfazer a condição exigida pela NBR 7190/1997, as relações entre tensões à compressão devido à força normal e de momento fletor com o valor da resistência de projeto, isto é, as relações entre os valores solicitados e valores resistidos devem ser inferiores a 1.

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c0d}} = \frac{3,75}{9,6} + \frac{3,128}{9,6} = 0,716 \leq 1 \quad (6.18)$$

A peça resiste aos esforços axiais normais e de momentos fletores. Nas figuras Figura 6.3 e Figura 6.4 apresenta-se o relatório de cálculo emitido pelo *software*.

Figura 6.3 - Página 1 do relatório de cálculo para o ensaio 02

File - app2

```

1 C:\Users\dairl\AppData\Local\Programs\Python\Python310\python.exe "H:/Meu Drive/TCC/
  sSOFTWARE_01/app.py"
2 VERIFICAÇÃO DE ESFORÇOS NA MADEIRA
3
4 Qual normativa você pretende utilizar?
5 (1) NBR 7190/1997 (2) NBR 7190/2022
6 1
7 Qual o tipo de ação exercida na madeira?
8 (1) Tração (2) Compressão
9 2
10 Você escolheu verificação à COMPRESSÃO!
11 Por favor, todos os dados a serem informados devem possuir o PONTO como separador decimal.
12
13 Você saberia informar o valor da resistência à compressão paralela às fibras
14 e valor médio do módulo de elasticidade?
15 (1) Sim (2) Não
16 2
17 Então, vamos escolher uma classe de resistência!
18 Você pretende trabalhar com CONÍFERA ou DICOTILEDÔNEA?
19 (1) Coníferas (2) Dicotiledôneas
20 1
21 Dentre as opções abaixo, qual classe de resistência te atende?
22 (1) C20 (2) C25 (3) C30
23 3
24 Você saberia informar o valor do coeficiente de modificação?
25 (1) Sim (2) Não
26 2
27 Então vamos determinar o coeficiente de modificação!
28
29 Qual o tipo de madeira utilizada?
30 (1) Serrada, laminada colada ou compensada (2) Recompоста
31 1
32 Dentre as opções abaixo, qual a classe de carregamento te atenderia?
33 (1) Permanente
34 (2) Longa duração
35 (3) Média duração
36 (4) Curta duração
37 (5) Instantânea
38 2
39 Dentre as opções abaixo, qual a classe de umidade do ambiente?
40 (1) Menor ou igual a 65%
41 (2) Entre 65,1% e 75%
42 (3) Entre 75,1% e 85%
43 (4) Maior que 85%
44 3
45 Dentre as opções abaixo, qual a categoria da madeira?
46 (1) 1ª categoria (2) 2ª categoria
47 2
48 A resistência de cálculo à compressão paralela às fibras da madeira é de 9.6 MPa
49
50 Informe o comprimento da peça: (em metros)
51 4
52 A peça é engastada em uma extremidade e livre na outra?
53 (1) Sim (2) Não
54 2
55 Dentre as opções abaixo, qual é o tipo da seção transversal?
56 (1) Circular (2) Quadrada (3) Retangular
57 2
58 Informe a medida do lado da seção transversal da peça: (em metros)
59 0.2
60 A peça é medianamente esbelta.

```

Figura 6.4 - Página 2 do relatório de cálculo para o ensaio 02

File - app2

```
61
62 Qual o esforço exercido nas extremidades da barra? (em Newtons)
63 150000
64 Qual o momento exercido na peça? (em N.m)
65 0
66 A tensão de compressão paralela às fibras da madeira é de 6.878280286950595 MPa
67 Conforme a NBR 7190/1997, a peça de madeira RESISTE ao esforço solicitante!
68
69 Process finished with exit code 0
70
```

6.3 ENSAIO DE VERIFICAÇÃO À TRAÇÃO PELA NBR 7190/2022

Busca-se determinar, pela NBR 7190/2022, a resistência à tração paralela às fibras e a resistência de ruptura por tração de uma peça de madeira serrada da classe folhosa, advinda de uma floresta plantada, de segunda categoria e que será instalada em um ambiente com classe de umidade de 2. Deve-se considerar que o carregamento é de longa duração, pertencente a classe D40, com seção transversal retangular de 20 x 30 cm e comprimento de 3 metros.

Analisando a Tabela 4.3, que dispõe dos valores para as folhosas de florestas plantadas, para a classe de resistência D40, a resistência característica à compressão paralela às fibras (f_{c0k}) é de 26 MPa, a resistência característica à tração paralela às fibras (f_{t0k}) é de 24 MPa e o valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela as fibras ($E_{c0,m}$) de 13 GPa.

Para a determinação da resistência de projeto à tração paralela às fibras, deve-se calcular o coeficiente de modificação (k_{mod}). O coeficiente parcial 01, relativo à classe de carregamento de longa duração, é no valor de 0,70. O coeficiente parcial 02, referente à classe de umidade 2, o valor é de 0,9. Desta forma, o coeficiente de modificação k_{mod} encontrado com a multiplicação dos dois coeficientes parciais, é de 0,63, conforme Equação (6.19).

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} = 0,70 \cdot 0,90 = 0,63 \quad (6.19)$$

Com todos os valores conhecidos (f_{t0k} e k_{mod}), e considerando o coeficiente de minoração no valor de 1,4 para tração, pode-se encontrar a resistência de projeto (f_{td}), correspondente a 10,8 MPa.

$$f_{td} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t0k}}{\gamma_w} = 0,63 \cdot \frac{24}{1,4} = 10,8 MPa \quad (6.20)$$

Por fim, para o cálculo da resistência à ruptura, deve-se encontrar a área da seção transversal da peça, obtido no valor de 600 cm² ou 0,06 m². Assim, basta aplicar a Equação (4.4) , encontrando o valor de 648 kN.

$$N_{td} = f_{td} \cdot A = 10,8 \cdot 0,06 = 648kN \quad (6.21)$$

Comparando o resultado com o valor dimensionado pela NBR 7190/1997, verifica-se que a força de ruptura de projeto foi alterada para menos, em mais de 33% (969,6 kN pela substituída NBR 7190/1997).

Aplicando os mesmos dados do ensaio no *software* desta pesquisa, tem-se o relatório de cálculo demonstrado nas figuras Figura 6.5 e Figura 6.6. É importante ressaltar que foram encontrados os mesmos valores, pelo ensaio manual e pelo programa, demonstrando a exatidão e eficácia do *software*.

Figura 6.5 - Página 1 do relatório de cálculo para o ensaio 03

File - app2

```

1 C:\Users\dair\AppData\Local\Programs\Python\Python310\python.exe "H:/Meu Drive/TCC/
  sSOFTWARE_01/app.py"
2 VERIFICAÇÃO DE ESFORÇOS NA MADEIRA
3
4 Qual normativa você pretende utilizar?
5 (1) NBR 7190/1997 (2) NBR 7190/2022
6 2
7 Qual o tipo de ação exercida na madeira?
8 (1) Tração (2) Compressão
9 1
10 Você escolheu verificação à TRAÇÃO!
11 Por favor, todos os dados a serem informados devem possuir o PONTO como separador decimal.
12
13 Qual o tipo de floresta que a peça veio?
14 (1) Floresta nativa (2) Floresta plantada
15 2
16 Você saberia informar o valor da resistência característica à tração paralela às fibras da madeira
17 e o valor médio do módulo de elasticidade?
18 (1) Sim (2) Não
19 2
20 Então vamos escolher uma classe de resistência!
21
22 Você pretende trabalhar com CONÍFERA ou FOLHOSA?
23 (1) Coníferas (2) Folhosas
24 2
25 Dentre as opções abaixo, qual classe de resistência te atende?
26 (1) D18 (2) D24 (3) D30 (4) D35 (5) D40 (6) D50 (7) D60 (8) D70
27 5
28 Você saberia informar o valor do coeficiente de modificação?
29 (1) Sim (2) Não
30 2
31 Então vamos determinar o coeficiente de modificação!
32
33 Qual o tipo de madeira utilizada?
34 (1) Serrada, roliça, lamelada colada, lamelada colada cruzada ou laminada colada (2) Recompоста
35 1
36 Dentre as opções abaixo, qual a classe de carregamento te atenderia?
37 (1) Permanente
38 (2) Longa duração
39 (3) Média duração
40 (4) Curta duração
41 (5) Instantânea
42 2
43 Dentre as opções abaixo, qual a classe de umidade do ambiente?
44 (1) Menor ou igual a 65%
45 (2) Entre 65,1% e 75%
46 (3) Entre 75,1% e 85%
47 (4) Maior que 85%
48 2
49 A resistência de cálculo à tração paralela às fibras da madeira é de 10.8 MPa
50
51 Dentre as opções abaixo, qual é o tipo da seção transversal?
52 (1) Circular (2) Quadrada (3) Retangular
53 3
54 Informe a medida da base da seção transversal da peça: (em metros)
55 0.2
56 Informe a medida da altura da seção transversal da peça: (em metros)
57 0.3
58 Qual o esforço exercido nas extremidades da barra? (em Newton)
59 150000
60 A tensão de tração paralela às fibras da madeira é de 2.5 MPa

```

Figura 6.6 - Página 2 do relatório de cálculo para o ensaio 03

File - app2

61 Conforme a NBR 7190/2022, a peça de madeira RESISTE ao esforço solicitante!
62 A máxima força resistida pela peça é de 648.0 kN.
63
64 Process finished with exit code 0
65

6.4 ENSAIO DE VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO PELA NBR 7190/2022

Busca-se, conforme a NBR 7190/2022, calcular a resistência à compressão de um pilar de madeira serrada de segunda categoria, sabendo que a peça analisada é uma conífera, de classe C30, com seção 20 x 20 centímetros e altura de 4 metros. Deve-se considerar a classe de umidade 3, floresta de madeiras plantadas e carregamento de longa duração. Ainda, deve-se verificar se a peça em questão suporta uma força axial de projeto de 150 kN e qual a máxima força suportada.

Analisando a Tabela 4.3, que dispõe dos valores de resistência definidos em ensaios, verifica-se que, para a classe C30 em conífera, a resistência característica à compressão paralela às fibras (f_{c0k}) é de 23 MPa, a resistência característica à tração paralela às fibras (f_{t0k}) é de 18 MPa, o valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela as fibras ($E_{c0,m}$) de 12 GPa e o módulo de elasticidade a 0° característico ($E_{0,05}$) de 8 GPa.

Para a determinação da resistência de projeto à compressão paralela às fibras, deve-se calcular o coeficiente de modificação (k_{mod}). O coeficiente parcial 01, relativo à classe de carregamento de longa duração, é no valor de 0,70. O coeficiente parcial 02, referente à classe de umidade 3, o valor é de 0,80. Desta forma, o coeficiente de modificação k_{mod} encontrado com a multiplicação dos dois coeficientes parciais, é de 0,56, conforme Equação (6.22).

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} = 0,70 \cdot 0,80 = 0,56 \quad (6.22)$$

Com todos os valores conhecidos (f_{c0k} e k_{mod}), e considerando o coeficiente de minoração no valor de 1,4 para compressão, pode-se encontrar a resistência de projeto (f_{cd}), correspondente a 9,2 MPa.

$$f_{cd} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0k}}{\gamma_w} = 0,56 \cdot \frac{23}{1,4} = 9,2 MPa \quad (6.23)$$

Para verificar se a peça necessita satisfazer a condição de estabilidade, deve-se inicialmente calcular o índice de esbeltez, para posterior cálculo da esbeltez relativa. Para

a seção dada de 20 x 20 cm, tem-se uma área de 400 cm². Para o momento de inércia na direção de x e y, tem-se o valor de 13333,33 cm⁴ para ambas direções. Considerando o coeficiente K_E com valor 1,0, tem-se o índice de esbeltez de 69,282 e a esbeltez relativa de 1,182.

$$I_x = I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{20 \cdot 20^3}{12} = 13333,33 \text{ cm}^4 \quad (6.24)$$

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{400}{\sqrt{\frac{13333,33}{400}}} = 69,282 \quad (6.25)$$

$$\lambda_{rel,x} = \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0k}}{E_{0,05}}} = \frac{69,282}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{23}{8000}} = 1,182 \quad (6.26)$$

Como o índice de esbeltez relativa é maior que 0,3 em qualquer direção x e y, a peça de madeira analisada deve satisfazer à condição de estabilidade. Para tal condição, devem ser calculados os coeficientes de correção (k_{cx} e k_{cy}). Considerando o fator (β_c) para madeira serrada de 0,2, obtém-se os valores de k_x e k_y de 1,287 e K_c de 0,557.

$$k_x = k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + (\lambda_{rel})^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,2 \cdot (1,182 - 0,3) + (1,182)^2] = 1,287 \quad (6.27)$$

$$k_{cx} = k_{cy} = \frac{1}{k + \sqrt{(k^2) - (\lambda_{rel}^2)}} = \frac{1}{1,287 + \sqrt{(1,287^2) - (1,182^2)}} = 0,557 \quad (6.28)$$

$$\frac{\sigma_{Ncd}}{k_c \cdot f_{c0d}} = \frac{\frac{N_{cd}}{0,04}}{0,557 \cdot 9,2 \cdot 10^3} = \frac{N_{cd}}{0,205 \cdot 10^3} \leq 1 \quad (6.29)$$

Para satisfazer a condição exigida pela NBR 7190/2022, a força máxima de compressão deve ser de 205 kN. Portanto, a força de 150 kN é suportada. Nas figuras Figura 6.7 e Figura 6.8 é exibido o relatório de cálculo emitido pelo programa.

Figura 6.7 - Página 1 do relatório de cálculo para o ensaio 04

File - app2

```

1 C:\Users\dairl\AppData\Local\Programs\Python\Python310\python.exe "H:/Meu Drive/TCC/
  sSOFTWARE_01/app.py"
2 VERIFICAÇÃO DE ESFORÇOS NA MADEIRA
3
4 Qual normativa você pretende utilizar?
5 (1) NBR 7190/1997 (2) NBR 7190/2022
6 2
7 Qual o tipo de ação exercida na madeira?
8 (1) Tração (2) Compressão
9 2
10 Você escolheu verificação à COMPRESSÃO!
11
12 Por favor, todos os dados a serem informados devem possuir o PONTO como separador decimal.
13
14 Qual o tipo de floresta que a peça veio?
15 (1) Floresta nativa (2) Floresta plantada
16 2
17 Você saberia informar o valor da resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira?
18 (1) Sim (2) Não
19 2
20 Então vamos escolher uma classe de resistência!
21
22 Você pretende trabalhar com CONÍFERA ou FOLHOSA?
23 (1) Coníferas (2) Folhosas
24 1
25 Dentre as opções abaixo, qual classe de resistência te atende?
26 (1) C14 (2) C16 (3) C18 (4) C20 (5) C22 (6) C24 (7) C27 (8) C30 (9) C35 (10) C40 (11
  ) C45 (12) C50
27 8
28 Você saberia informar o valor do coeficiente de modificação?
29 (1) Sim (2) Não
30 2
31 Então vamos determinar o coeficiente de modificação!
32
33 Qual o tipo de madeira utilizada?
34 (1) Serrada, roliça, lamelada colada, lamelada colada cruzada ou laminada colada (2) Recompota
35 1
36 Dentre as opções abaixo, qual a classe de carregamento te atenderia?
37 (1) Permanente
38 (2) Longa duração
39 (3) Média duração
40 (4) Curta duração
41 (5) Instantânea
42 2
43 Dentre as opções abaixo, qual a classe de umidade do ambiente?
44 (1) Menor ou igual a 65%
45 (2) Entre 65,1% e 75%
46 (3) Entre 75,1% e 85%
47 (4) Maior que 85%
48 3
49 A resistência de cálculo à compressão paralela às fibras da madeira é de 9.2 MPa
50
51 Informe o comprimento da peça: (em metros)
52 4
53 Qual a configuração da peça analisada?
54 (1) Engastados em ambas extremidades
55 (2) Engastado em uma extremidade e apoiado em outra
56 (3) Engastado em uma extremidade e translações livres em outra
57 (4) Apoiados em ambas extremidades
58 (5) Engastado em uma extremidade e rotulado em outra
59 (6) Apoiado em uma extremidade e translações livres em outra

```

Page 1 of 2

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Figura 6.8 - Página 2 do relatório de cálculo para o ensaio 04

File - app2

```
60 4
61 Dentre as opções abaixo, qual é o tipo da seção transversal?
62 (1) Circular (2) Quadrada (3) Retangular
63 2
64 Informe a medida do lado da seção transversal da peça: (em metros)
65 0.2
66 Qual o esforço de compressão exercido nas extremidades da barra? (em Newtons)
67 150000
68 A peça necessita satisfazer a condição de estabilidade em x e y.
69
70 Qual o tipo de madeira utilizada?
71 (1) Serrada ou roliça (2) Lamelada colada, lamelada colada cruzada ou laminada colada
72 1
73 Conforme a NBR 7190/2022, a peça de madeira RESISTE ao esforço solicitante na condição de
    estabilidade em ambas direções!
74
75 Conforme a NBR 7190/2022, a peça de madeira RESISTE ao esforço solicitante na condição de
    segurança!
76
77 A máxima força resistida pela peça é de 204.85920684879198 kN.
78
79 Process finished with exit code 0
80
```

CAPÍTULO 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das normas NBR 7190/1997 e NBR 7190/2022, juntamente com a análise dos aspectos da madeira outorga diversos benefícios para um futuro profissional da área, como: os benefícios que o uso da madeira traz para a sociedade e para a construção civil em si; a importância de estudar elementos estruturais submetidos à compressão de uma peça de madeira, diante do potencial do país no âmbito do reflorestamento; a inserção do conhecimento a partir novas tecnologias que tendem a aumentar cada vez mais; entre outros.

É importante ressaltar que o *software* desenvolvido efetua os cálculos com exatidão, demonstrados através dos ensaios numéricos realizados no CAPÍTULO 6 seguindo criteriosamente o estabelecido nas normativas NBR 7190/1997 e NBR 7190/2022.

Salienta-se que todos os objetivos destacados no item 1.3, como estudar a linguagem Python e o dimensionamento através das normativas NBR 7190/1997 e NBR 7190/2022, para a implementação de um *software* capaz de verificar peças submetidas à tração e compressão, bem como a validação de seus resultados, foram integralmente alcançados. Os resultados exibidos pelo programa foram iguais aos resultados verificados manualmente no CAPÍTULO 6, demonstrando exatidão dos valores e eficácia do *software* em relação às peças tracionadas e comprimidas.

Ainda, vale acentuar que, dada a recente publicação da nova edição da Norma NBR 7190/2022, esta pesquisa ganha relevo, sobretudo pelo impacto nos novos métodos de dimensionamento estrutural.

Em relação à forma de entrada de dados do *software*, ele foi desenvolvido permitindo que o usuário insira informações sobre a peça de madeira, em forma de diálogo, promovendo a facilidade na tomada de decisões com uma maneira, que se supõe, mais intuitiva.

O programa em questão apresenta algumas limitações no âmbito de esforços solicitantes, aplicados somente a efeitos de tração e compressão, e ainda a peças curtas e medianamente esbeltas (especificado pela NBR 71090/1997). Ressalta-se que o dimensionamento de estruturas de madeira pode se estender à efeitos de flexão,

flexotração e flexocompressão, devendo estes serem verificados pelas normativas vigentes e seguir seus critérios de forma exata.

Além destes caminhos para continuidade da pesquisa, torna-se essencial a criação de uma interface gráfica para apresentação do programa, permitindo que este seja divulgado de forma clara e objetiva aos usuários.

Como um adicional de sugestão para trabalhos futuros, a continuação do código para efetuação de um relatório em formato “PDF” se torna necessária, adicionando cálculos realizados por ambas normativas presentes nesta pesquisa, podendo auxiliar o usuário no agrupamento de todas as informações inseridas e cálculos posteriores.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. A. DE O. Madeira como material estrutural. Em: **Livro Materiais de Construção Civil**. 3. ed. São Paulo: Geraldo C. Isaia, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7190/1997. NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. **Rio de Janeiro**. 1997, p. 107.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7190/2012. NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. **Rio de Janeiro**. 2012, p. 107.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7190/2022. NBR 7190 - Critérios de dimensionamento. **Rio de Janeiro**. 2022, p. 107.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário Estatístico ABRAF 2013 (Ano base 2012)**. Brasília: ABRAF, 2013. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3910>>. Acesso em: 26 maio. 2022.

BRANCO, J. M. **Casas de madeira. Da tradição aos novos desafios**. Casas de Madeira. **Anais...** Em: SEMINÁRIO CASAS DE MADEIRA. Lisboa: P.B. Lourenço, J.M. Branco, H. Cruz e L. Nunes, 2013.

CAIMI, B. **Árvore Peroba**. Disponível em: <<https://wordpress.org/openverse/image/2780cc70-8d97-42e8-89d1-2635ba4c10a3>>. Acesso em: 11 abr. 2022.

COFANI, F. S. **SOFTWARE DE APOIO À APRENDIZAGEM PARA DIMENSIONAMENTO DE PILARES EM MADEIRA SUBMETIDOS À COMPRESSÃO OU À FLEXOCOMPRESSÃO**. TCC (Graduação) - Departamento Acadêmico de Construção Civil—Campo Mourão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

GESUALDO, F. A. R. **ESTRUTURAS DE MADEIRA**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Civil, 2003.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **As árvores cultivadas e a madeira na construção civil**. Brasília: IBÁ, 2020. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/e-mail-marketing/livre/info-madeira-construcao.pdf>>. Acesso em: 3 maio. 2022.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual IBÁ 2021**. São Paulo: IBÁ, 2021. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>>. Acesso em: 12 maio. 2022.

JUCÁ, S. C. S. A relevância dos softwares educativos na educação profissional. **Ciências & Cognição**, v. 8, 2006.

JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. G. **O SETOR FLORESTAL NO BRASIL E A IMPORTÂNCIA DO REFLORESTAMENTO**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2002.

LYNCH, P. **Japão terá arranha-céu de 340 metros de altura feito de madeira**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/889272/japao-tera-arranha-ceu-de-340-metros-de-altura-feito-de-madeira>>. Acesso em: 19 jun. 2022.

MADEIRA E CONSTRUÇÃO. **Maior prédio de madeira do mundo está na Noruega**. **Madeira e Construção**, 2019. Disponível em: <<https://madeiraeconstrucao.com.br/maior-predio-de-madeira-do-mundo-esta-na-noruega/>>. Acesso em: 19 jun. 2022

MANOSSO, R. **Pinheiros do Paraná**. Disponível em: <<https://wordpress.org/openverse/image/1d465754-021d-45bf-9524-4e58311c3157>>. Acesso em: 11 abr. 2022.

MELLO, R. L. DE. **Projetar em Madeira: uma nova abordagem**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo—Brasília: Universidade de Brasília, 2007.

MENEZES, N. N. C. **Introdução à Programação com Python: Algoritmos e lógica de programação para iniciantes**. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2010.

MERCADANTE, M. **Ipê branco**. Disponível em: <<https://wordpress.org/openverse/image/b3abc275-58de-4cb8-a8e8-d71f3343a9c4>>. Acesso em: 11 abr. 2022.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.

RITTER, M. A. **Timber bridges: Design, construction, inspection, and maintenance**. US United States Department of Agriculture, Forest Service, Engineering Staff: University Press of the Pacific, 1990.

SANTOS, P. N. T. **Pinheiro-bravo**. Disponível em: <<https://wordpress.org/openverse/image/f455b742-8687-4273-a93f-f4e0f42a7ed5>>. Acesso em: 11 abr. 2022.

SEGUNDINHO, P. et al. Glued laminated timber (GLULAM) with Acacia mangium and structural adhesives. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, p. 533–540, 1 set. 2015.

SILVA, J. L. DA; PRAVIA, Z. M. C. JWood: um objeto educacional para aprendizado de elementos de estruturas de madeira. **Semina Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 39, n. 2, p. 133, 29 dez. 2018.

SILVA, T. L. DA. **ESTRUTURAS DE MADEIRA: IMPLEMENTAÇÃO DE UM SOFTWARE PARA O DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS TRACIONADAS**. TCC (Graduação)—Jataí - GO: Instituto Federal de Goiás - Campus Jataí, 2021.

SILVA, T. S. B. **Explorar a potencialidade de um edifício construído com madeira lamelada colada cruzada (MLCC): da organização espacial interior à relação**

interior - exterior. Dissertação (Mestrado em CONstrução e Tecnologia)—[s.l.] Universidade do Minho, 2014.

SZÜCS, C. A. et al. **Estruturas de madeira.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

VIDAL, J. M. et al. PRESERVAÇÃO DE MADEIRAS NO BRASIL: HISTÓRICO, CENÁRIO ATUAL E TENDÊNCIAS. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 257–271, 29 mar. 2015.

YAMA, L. **Imperdível no Japão: templo Horyu-ji é a construção de madeira mais antiga do mundo.** **Coisas do Japão**, 6 jan. 2021. Disponível em: <<https://coisasdojapao.com/2021/01/horyu-ji/>>. Acesso em: 19 jun. 2022

ZENID, J. G. **MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2011.