



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VALMIRO ALVES MARTINS

**WOODEN STRUCTURES E METALLIC STRUCTURES:
SOFTWARES DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS
DESENVOLVIDOS EM JAVA**

Palmas/TO
2023

VALMIRO ALVES MARTINS

**WOODEN STRUCTURES E METALLIC STRUCTURES:
SOFTWARES DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS
DESENVOLVIDOS EM JAVA**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil para obtenção do título de bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. DSc. Bruno Carrilho de Castro

Palmas/TO
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M386w Martins, Valmiro Alves.

Wooden Structures e Metallic Structures: softwares de pré-dimensionamento de estruturas desenvolvidos em Java. / Valmiro Alves Martins. – Palmas, TO, 2023.

73 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2023.

Orientador: Bruno Canilho de Castro

1. Pré-dimensionamento de estruturas. 2. Aço. 3. Madeira. 4. Linguagem de programação Java. I. Título

CDD 624

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

VALMIRO ALVES MARTINS

WOODEN STRUCTURES E METALLIC STRUCTURES: SOFTWARES DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DESENVOLVIDOS EM JAVA

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil para obtenção do título de bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 05 / 07 / 2023

Banca Examinadora



Prof. DSc. Bruno Carrilho de Castro, UFT



Prof. Dr. Roldão Pimentel de Araújo Júnior
Matricula 1783498
Eng. Civil/UFT

Prof. DSc. Roldão Pimentel de Araújo Júnior, UFT



Prof. DSc. Humberto Xavier de Araújo, UFT

Palmas/TO, 2023

Dedico este trabalho aos profissionais e entusiastas de Engenharia Civil e a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para que pudesse ser realizado.

RESUMO

Este trabalho trata de uma pesquisa aplicada que aborda o desenvolvimento de dois *softwares* de pré-dimensionamento de estruturas, sendo um desses referente ao aço e o outro a madeira. O estudo objetivou demonstrar de forma prática, a integração dos *softwares* computacionais com a engenharia civil, seja em âmbito acadêmico ou profissional. Para tanto, foi utilizada a linguagem de programação Java associada a componentes externos levantados no referencial teórico, ainda, através de roteiros adaptados de pré-dimensionamento de estruturas de aço e madeira dispostos na bibliografia. A partir da elaboração dos sistemas foi possível constatar a importância do pré-dimensionamento, que incorporado a uma ferramenta adequada pode possibilitar ao usuário maior dinamismo e assertividade na sua atuação profissional, otimizando tempo e recursos na captação de clientes e no desenvolvimento de projetos. As ponderações conclusivas sobre o estudo revelam um campo de aplicação pouco explorado de forma tão específica, além de incentivar trabalhos futuros para aprimorar tais sistemas, e estreitar cada vez mais a relação entre áreas como a computação e a engenharia.

Palavras-chaves: Java. Software. Pré-dimensionamento. Aço. Madeira. Estruturas.

ABSTRACT

This work deals with an applied research that addresses the development of two software for pre-dimensioning structures, one of which refers to steel and the other to wood. The study aimed to demonstrate in a practical way, the integration of computational software with civil engineering, whether in an academic or professional context. For that, the Java programming language was used associated with external components raised in the theoretical framework, also through adapted scripts for pre-dimensioning steel and wood structures arranged in the bibliography. From the elaboration of the systems, it was possible to verify the importance of pre-dimensioning, which, incorporated to an adequate tool, can allow the user to be more dynamic and assertive in their professional performance, optimizing time and resources in attracting clients and developing projects. The conclusive considerations on the study reveal a field of application little explored in such a specific way, in addition to encouraging future work to improve such systems, and to increasingly strengthen the relationship between areas such as computing and engineering.

Key-words: Java. Software. Pre-sizing. Steel. Wood. Structures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.....	21
Figura 2.2 - Perfil I ou duplo Tê.....	23
Figura 2.3 - Perfil H.....	24
Figura 2.4 - Variação da resistência	35
Figura 2.5 - Tensões normais em vigas	38
Figura 3.1 - Referência Comercial - Wooden Structures	45
Figura 3.2 - Características das espécies do <i>software</i> - Wooden Structures	46
Figura 4.1 - Diagrama das funcionalidades - Wooden Structures.....	49
Figura 4.2 - Configuração dos pavimentos - Wooden Structures	50
Figura 4.3 - Tela Principal - Wooden Structures.....	50
Figura 4.4 - Página inicial “Manual de utilização – Wooden Structures	51
Figura 4.5 - Cargas do pavimento - Wooden Structures	52
Figura 4.6 - Cargas Variáveis - Wooden Structures.....	52
Figura 4.7 - Carga sobre o elemento - Wooden Structures	53
Figura 4.8 - Modelo Tridimensional - Wooden Structures	54
Figura 4.9 - Preferências 3D - Wooden Structures.....	54
Figura 4.10 - Modelo Tridimensional - Wooden Structures	55
Figura 4.11 - Diagrama das funcionalidades - Metallic Structures	56
Figura 4.12 - Gerar relatório.....	56
Figura 4.13 - Copiar dados	57
Figura 4.14 - Visualização tridimensional.....	57
Figura 4.15 - Cálculo de elemento isolado	58
Figura 4.16 - Edição de pavimentos e modelos genéricos	58
Figura 4.17 - Referências comerciais e Manual do software	59
Figura 4.18 - Tela principal - Metallic Structures	59
Figura 4.19 - Processando o modelo - Metallic Structures.....	60
Figura A.1 - Estrutura lançada (Wooden Structures)	64
Figura A.2 - Visualização tridimensional (Wooden Structures)	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficientes de variação	33
Tabela 2.2 – Relações entre valores característicos de tensões resistentes	33
Tabela 2.3 – Valores de k_{mod1}	36
Tabela 2.4 – Valores de k_{mod2}	36
Tabela 2.5 – Classes de umidade.....	37
Tabela 2.6 – Valores de β_m	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ASTM	American Society for Testing and Materials
Eq.	Equação
FLA	Flambagem Local da Alma
FLM	Flambagem Local da Mesa
FLT	Flambagem Lateral com Torção
GPa	Gigapascal
kN/m ³	Quilonewton por Metro Cúbico
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
3D	Tridimensional
IDE	Integrated Development Environment
API	Application Programming Interface
PDF	Portable Document Format
OpenGL	Open Graphics Library

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
A_g	Área bruta
A_w	Área efetiva de cisalhamento
B	Largura ou Base da seção
β	Coefficiente de dilatação térmica
β_m	Fator da flambagem lateral com torção
b_f	Largura da mesa
d	Altura externa da seção
δ	Coefficiente de variação ou flecha
δ_{max}	Flecha máxima admissível
E	Módulo de elasticidade
$E_{c,ef}$	Módulo de elasticidade efetiva
E_u	Módulo de elasticidade na umidade u (%)
$f_{c,k}$	Resistência à compressão paralela às fibras característica
f_{cd}	Tensão resistente de projeto à compressão
$f_{cn,k}$	Resistência à compressão normal às fibras característico
f_{cr}	Tensão crítica
f_k	Resistência característica
f_m	Resistência média
$f_{M,k}$	Resistência média à tração, medida no ensaio de flexão de peça retangular admitindo diagrama linear de tensões
f_r	Tensão residual
$f_{t,k}$	Resistência à tração paralela às fibras característica
f_u	Resistência à ruptura do aço à tração
$f_{v,k}$	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras característico
f_y	Resistência ao escoamento do aço
G	Módulo de elasticidade transversal do aço
h	Altura
I	Momento de Inércia em torno do eixo flexionado
I_t	Momento de inércia à torção
K	Coefficiente de flambagem
k_{mod}	Coefficiente que soma os efeitos da umidade, tempo de duração do carregamento e ocorrência de defeitos
k_{pg}	Parâmetro para dimensionamento de vigas esbeltas
L	Comprimento ou Vão teórico
l_1	Distância entre pontos de contenção lateral
L_b	Maior distância entre travamentos
λ	Parâmetro de esbeltez
λ_a	Parâmetro de esbeltez da alma
λ_{lt}	Parâmetro de esbeltez
λ_m	Parâmetro de esbeltez da mesa
λ_{pa}	Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas
λ_{plt}	Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas
λ_{pm}	Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas
λ_{ra}	Parâmetro de esbeltez limite para seções semcompactas
λ_{rm}	Parâmetro de esbeltez limite para seções semcompactas
M	Momento fletor
M_{cr}	Momento fletor de flambagem elástica

M_d	Momento de projeto
M_n	Momento nominal
M_{na}	Momento nominal da alma
M_{pl}	Momento de plastificação
M_r	Momento fletor correspondente ao início do escoamento
P_{cr}	Carga crítica de flambagem
q	Carregamento
q_d	Carga distribuída de projeto
r	Raio de giração
R_d	Reação de projeto
R_n	Resistência Nominal do Material.
R_{nk}	Resistência característica do material
r_y	Raio de giração em torno do eixo Y
S	Momento estático referido ao centro de gravidade da seção
S_d	Solicitação de Cálculo
t	Espessura
σ_{cnd}	Tensão de compressão normal às fibras
t_f	Espessura da mesa
t_w	Espessura da alma
u	Umidade (%)
V	Força cortante
ν_a	Coefficiente de Poisson
W	Módulo resistente elástico da seção
W_c	Módulo resistente elástico de compressão, relativo ao eixo de flexão
W_t	Módulos de resistência à flexão referidos aos bordos tracionados
W_{xc}	Módulo de resistência elástica do lado comprimido
W_{xt}	Módulo de resistência elástica do lado tracionado
Y_a	Peso Específico
γ_w	Coefficiente de minoração da resistência para madeira
Z	Módulo de resistência plástico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	Problema de pesquisa.....	14
1.1.1.	Hipótese	14
1.1.2.	Delimitação de Escopo	15
1.1.3.	Justificativa.....	15
1.2.	Objetivos.....	16
1.2.1.	Objetivo Geral	16
1.2.2.	Objetivos Específicos	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1.	Estruturas metálicas.....	18
2.1.1	Métodos dos Estados Limites	19
2.1.2	Carregamentos	20
2.1.3	Aspectos do pré-dimensionamento.....	20
2.2.	Estruturas de madeira	32
2.2.1	Aspectos do pré-dimensionamento.....	35
2.2.1.1	Verificação da compressão e da tração paralela às fibras	37
2.2.1.2	Verificação da compressão normal às fibras	38
2.2.1.3	Verificação do cisalhamento paralelo às fibras	39
2.2.1.4	Verificação da deflexão máxima	40
2.2.1.5	Verificação da Flambagem Lateral com Torção (FLT).....	40
2.2.2	Considerações finais	41
3.	METODOLOGIA.....	43
3.1.	Concepção	43
3.2.	Desenvolvimento	43
3.2.1	Ambiente de desenvolvimento	44
3.2.2	Técnicas	44
3.2.3	Coleta de dados.....	45
3.2.4	Tomada de decisões.....	46
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	49
4.1.	Wooden Structures	49
4.2.	Metallic Structures	55
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A - RELATÓRIO FINAL DO SISTEMA WOODEN STRUCTURES.....	64

1. INTRODUÇÃO

“A informática, na sua essência, veio para aperfeiçoar a Engenharia de Estruturas, e jamais substituí-la” (KIMURA, 2008, p. 19). É muito comum, nos dias atuais, profissionais que dependem exclusivamente de análises disponíveis nos *softwares*, para desempenharem suas respectivas atribuições. Dito isso, é importante compreender que o papel do computador na engenharia é servir como mecanismo auxiliar na tomada de decisões.

O *software*, ferramenta computacional de extrema importância, permitiu inovar a Engenharia Civil, e fez com que trabalhos manuais demorados e suscetíveis a inúmeros erros, fossem realizados de forma organizada seguindo um determinado critério ou norma técnica, além de possibilitar criações mais sofisticadas de projeto e tornar o modelo de análise estrutural mais realista. A estimativa de custos propiciada por ferramentas computacionais, “permite a projetistas executar engenharia de valor enquanto estão projetando, considerando alternativas, à medida que projetam, que fazem melhor uso dos recursos de seus clientes” (EASTMAN; TEICHOLZ; SACKS; LISTON, 2014, p.172).

No âmbito em que se refere este estudo, de modo a introduzir um conhecimento prévio quanto aos materiais discutidos pelo trabalho, é importante observar que a madeira utilizada na construção, deve se basear em técnicas de reflorestamento aliadas ao desenvolvimento de produtos industrializados com minimização de perdas. As diversas pesquisas acerca desses produtos e seu uso em sistemas estruturais, contribuíram com a expansão de sua utilização como material de construção (PFEIL; PFEIL, 2003).

Em analogia à madeira, podemos perceber que as estruturas metálicas estão sendo cada vez mais utilizadas, principalmente devido à sua rapidez e praticidade construtiva. Outro fator contribuinte para esse crescimento, pode ser compreendido pela precisão de medidas e a qualidade de fabricação industrial. Contudo, tanto as estruturas de madeira quanto as estruturas metálicas, são temas de estudo de extrema relevância na engenharia (PINHEIRO, 2005).

Desse modo, este trabalho propõe o desenvolvimento de *softwares* de pré-dimensionamento de estruturas metálicas e de madeira, para permitir aos projetistas dinamizar sua atuação profissional no seu cotidiano. Assume-se aqui, que o computador e suas aplicações tem papel fundamental na criação de novos saberes e possibilidades para a área de Engenharia Civil.

1.1. Problema de pesquisa

De acordo com um levantamento feito em 2009 pela ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural), foi constatado que a informatização reduziu cerca de 40% do tempo de desenvolvimento dos projetos (comparado a 1982). A pesquisa também concluiu que se consome mais tempo na fase de concepção do projeto, em função da análise de alternativas e reuniões de compatibilização. Além disso, a informatização introduziu novos custos para as empresas, acompanhado pelo aumento de impostos, gerando uma desarticulação do setor de projetos estruturais, implicando diretamente na qualidade dos serviços prestados.

No atual cenário da engenharia, existem inúmeros programas que realizam cálculos de dimensionamento estrutural, em contrapartida, tais ferramentas envolvem custos e para dominá-las é necessário, muitas vezes, realizar um estudo de manuseio do *software*, visto que, quase sempre o próprio não consegue transmitir de forma clara o que se espera do usuário, normalmente devido a própria complexidade de resolução que o sistema irá realizar. Diante disso, é de extrema importância a criação de *softwares* mais intuitivos e com um grau de abstração cada vez menor.

1.1.1. Hipótese

Em alternativa ao problema proposto, neste trabalho serão apresentadas inúmeras razões para o desenvolvimento contínuo e responsável de *softwares* para a engenharia, uma vez que, o uso de ferramentas computacionais auxilia o profissional na tomada de decisões, proporciona economia de tempo nas atividades, além de permitir ainda a verificação de diversas alternativas de projeto, com o intuito de se obter um modelo estrutural otimizado. Não há que duvidar, “os computadores podem executar cálculos e tomar decisões lógicas incrivelmente mais rápido que os seres humanos” (DEITEL; DEITEL, 2017, p. 3).

Os sistemas de pré-dimensionamento de aço e madeira que serão abordados, são carregados com inúmeros dados desses materiais, como espécies, perfis, propriedades e parâmetros de mercado. Com isso, o *software* realiza as verificações pertinentes para se obter as informações necessárias antecedentes a execução, além de facilitar a resolução de problemas, tais como: divergência de propriedades dos elementos utilizados, cálculos incorretos de quantitativos e orçamentos. A ideia é que o operador, com apoio do sistema, identifique por

meio de relatórios, os principais pontos a serem analisados e decididos para o início da construção ou simulação da estrutura.

1.1.2. Delimitação de Escopo

O dimensionamento estrutural exige do engenheiro o entendimento da natureza das solicitações, ou seja, cabe ao engenheiro avaliar uma dada estrutura e identificar quais os esforços que atuarão nela. O *software* responsável pelo cálculo das estruturas de madeira, pré-dimensiona vigas biapoiadas, isostáticas e com carregamento uniformemente distribuído na direção da gravidade. Nesse *software* as seguintes verificações serão realizadas: compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, deflexão máxima e flambagem lateral com torção. O *software* voltado às estruturas metálicas terá as seguintes condições de contorno: flexão simples, perfil I e H, carregamento uniformemente distribuído e peça isostática. Serão apresentadas verificações de flambagem local da alma, flambagem local da mesa, flambagem lateral com torção, cisalhamento e deflexão máxima.

O espaço compreendido para o processamento final da estrutura será a área de lançamento realizada no sistema pelo usuário, ao ponto que devem ser respeitadas as indicações e avisos presentes na aplicação. A criação do relatório final, com os devidos quantitativos e orçamentos, tem ligação direta com as seções mínimas calculadas, essas que são frutos das cargas da própria estrutura e das cargas adicionais informadas pelo usuário.

Ressalta-se que os cálculos e verificações já citados, são realizados por cada *software* de maneira independente e que o modelo clássico de viga contínua, simplesmente apoiada nos pilares e virtualmente separada dos demais elementos, não permite considerar de forma adequada os esforços ocasionados pelo vento, devendo ficar restrito a construções de pequeno porte (baixa altura).

1.1.3. Justificativa

No mercado atual e em âmbito acadêmico, sistemas exclusivos de verificações de aço e madeira são escassos, além de cada *software* de maneira individual possuir suas limitações e restrições. Justifica-se a elaboração do trabalho, devido a contribuição relevante que será acrescida na área, por se tratarem de programas extremamente intuitivos e claramente diretos

nos seus objetivos. A soma de rapidez, eficiência e praticidade consta desde o desenvolvimento até a distribuição do produto final.

O sistema por apresentar total transparência nos seus cálculos, preza pelo ponto de vista crítico e analítico dos resultados. Além disso, o principal diferencial dos *softwares* é compatibilizar a estrutura com padrões comerciais, à medida que, a esmagadora maioria de aplicações calculistas de estruturas, dimensionam o projeto, e conseqüentemente uma adaptação por parte do usuário posteriormente será necessária.

Devido às infinitas possibilidades de criação de uma estrutura completa, os *softwares* deste trabalho se restringem em aspectos complexos de cálculo. É importante salientar que a diferença entre pré-dimensionamento e dimensionamento é vasta, o que conseqüentemente implica no desenvolvimento de *softwares* complexos e abstratos. Também é necessário citar, que as verificações presentes no sistema, atendem a grande maioria dos casos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Desenvolver sistemas capazes de realizar o pré-dimensionamento estrutural, oferecendo suporte ao operador por meio de memoriais de cálculo, contendo verificações dos esforços pertinentes, bem como, cálculo de vão teórico, carga máxima, seção transversal e comprimento de flambagem. Por meios desses relatórios, as formulações usadas e os resultados obtidos pelo sistema poderão ser analisadas de forma detalhada. Ainda, exibir os parâmetros de mercado utilizados para quantificar e precificar os materiais definidos pelo usuário.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Implantar visualização tridimensional com o intuito de facilitar a percepção volumétrica da estrutura.
2. Auxiliar na concepção, de modo a identificar a solução mais viável economicamente à fim de otimizar o projeto.
3. Possibilitar o pré-dimensionamento de outros elementos, tais como: escadas, coberturas.

4. Facilitar a comparação e análise de diversos perfis e espécies quando submetidos a determinado carregamento.
5. Utilizar referências de preço do mercado de Palmas - TO, para garantir um orçamento final condizente ao que será encontrado quando a estrutura for executada.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os projetos estruturais elaborados no Brasil normalmente seguem critérios definidos por normas técnicas que, segundo a ABNT, “são documentos estabelecidos por consenso e aprovados por organismos reconhecidos, que fornecem regras, diretrizes ou características mínimas para atividades ou para seus resultados”. Ressalta-se ainda, que “a norma é, por princípio, de uso voluntário, mas quase sempre é usada por representar o consenso sobre o estado da arte de determinado assunto, obtido entre especialistas das partes interessadas”.

As principais normas de referência para estruturas metálicas, são a NBR 8800/2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto, NBR 8681/2003 – Ações e segurança nas estruturas, NBR 6120/2019 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações, e a NBR 6123/1988 – Forças devidas ao vento em edificações. Para atender a delimitação do escopo, serão abordados conceitos presentes na NBR 8800/2008, bem como na literatura de referência “Estruturas Metálicas” do doutor Antonio Carlos da Fonseca. Para as madeiras, serão utilizadas informações presentes na NBR 7190/1997 – Projeto de estruturas de madeira, e na bibliografia “Estruturas de Madeira” dos professores Walter Pfeil e Michèle Pfeil.

A respeito dos *softwares*, esses que utilizam a linguagem de programação orientada a objetos Java, fundamentações presentes na bibliografia de Paul Deitel e Harvey Deitel, intitulada “Java como programar”, bem como em documentações de bibliotecas para a linguagem, serão usadas como base teórica, para desenvolver ferramentas e componentes que compunham os sistemas computacionais abordados pelo autor.

A linguagem de programação Java é amplamente difundida e diversos trabalhos a seu respeito são encontrados. Entretanto, no contexto do estudo, poucos são os *softwares* desenvolvidos, e esses, tem como principal objetivo dimensionar a estrutura, não realizando, na maioria dos casos, o orçamento da mesma. Sistemas computacionais voltados às estruturas são influenciadores importantes na concepção e ideologia dos *softwares* discutidos pelo autor.

2.1. Estruturas metálicas

Neste item, serão descritos aspectos relacionados ao pré-dimensionamento de elementos estruturais de aço. Para isso, é imprescindível conhecer as características do próprio elemento. Dentre as diversas propriedades mecânicas que são adotadas para efeitos de cálculo, podemos citar:

- Módulo de Elasticidade, $E = \text{tg } \alpha = 205 \text{ GPa}$, sendo $\alpha = 89,99\dots^\circ$
- Coeficiente de Poisson, $\nu_a = 0,3$
- Módulo de Elasticidade Transversal, $G = 0,385 * E$
- Peso Específico, $Y_a = 77 \text{ kN/m}^3$
- Coeficiente de dilatação térmica, $\beta = 12 * 10^{-6}$

Quanto aos principais aços estruturais utilizados, temos:

- (ASTM) Aço A36, possuindo resistência ao escoamento, $f_y = 250\text{MPa}$, e resistência à ruptura do aço à tração, $f_u = 400\text{MPa}$.
- (NBR) MR 250, sendo $f_y = 250 \text{ MPa}$, $f_u = 400\text{MPa}$.
- (NBR) AR 290, sendo $f_y = 290 \text{ MPa}$, $f_u = 415\text{MPa}$.
- (NBR) AR 345, sendo $f_y = 345 \text{ MPa}$, $f_u = 450\text{MPa}$.

Outras propriedades do aço estrutural são ductibilidade, características de fragilidade em baixas temperaturas ambientes, resiliência, tenacidade, dureza, fadiga etc. Quanto à tipologia do material, temos as indústrias siderúrgicas, que produzem diversos produtos que podem ser classificados genericamente em: barras, chapas e perfis. E as empresas metalúrgicas, que produzem perfis compostos por chapas dobradas ou compostos por chapas soldadas.

É necessário para o dimensionamento de peças estruturais, determinar algumas características geométricas da seção plana transversal, tais como: área, centro de gravidade, momentos de inércia, produto de inércia, raio de giração, momento resistente plástico, momento resistente elástico etc. Ainda, deve-se determinar a estabilidade do conjunto e dos esforços internos solicitantes. O método de pré-dimensionamento estabelecido nos *softwares* é o dos estados limites, que será abordado na sequência.

2.1.1 Métodos dos Estados Limites

O estado limite se caracteriza como sendo a ruptura do elemento estrutural ou seu deslocamento excessivo. Esse método pode ser dividido em: estados limites últimos e estados limites de serviço. A verificação que deve ser atendida para os estados limites últimos, é descrita na Equação 2.1.

$$S_d \leq R_n \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Sendo:

S_d = Solicitação de Cálculo;

R_n = Resistência Nominal do Material.

Faz-se necessário compreender também, características dos carregamentos que atuam na estrutura.

2.1.2 Carregamentos

Segundo Pinheiro (2005, p. 31), “as cargas que atuam na estrutura são, também, chamadas de ações. As ações são estipuladas pelas normas apropriadas e são consequência das condições estruturais”.

As ações podem ser classificadas em:

- Permanentes (G): peso próprio da estrutura, revestimentos etc.
- Variáveis (Q): sobrecargas de ocupação, vento em coberturas, variação de temperatura etc.
- Excepcionais (E): abalo sísmico, explosões etc.

Vale lembrar que no método dos estados limites deve-se fatorar as cargas nominais provenientes das diversas ações que a estrutura está sujeita.

2.1.3 Aspectos do pré-dimensionamento

O sistema computacional respectivo ao aço, utiliza dos parâmetros de cálculo de barras flexionadas e comprimidas para dimensionar seus elementos estruturais. Para o dimensionamento de barras à compressão deve-se considerar, principalmente, a flambagem da peça, conforme descreve a NBR 8800/2008.

A carga crítica de flambagem, valor que é calculado pelo *software* para encontrar as seções mínimas das peças sujeitas à compressão, é definido como sendo a carga a partir da qual a barra que está sendo comprimida mantém-se em posição indiferente. O valor da carga crítica para uma barra bi-rotulada, normalmente é usado como referência.

A partir das formulações de Euler (PINHEIRO, 2005), podemos escrever a Equação 2.2.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * A}{\lambda^2} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Sendo:

P_{cr} = Carga crítica de flambagem;

E = Módulo de elasticidade do aço;

A = Área da seção transversal;

λ = Parâmetro de esbeltez.

O parâmetro de esbeltez, segundo a NBR 8800/2008, é tomado como a maior relação entre o produto KL e o raio de giração correspondente r , portanto deve-se utilizar a Equação 2.3.

$$\lambda = \frac{KL}{r} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Sendo:

λ = Parâmetro de esbeltez;

K = Coeficiente de flambagem;

L = Comprimento destravado;

r = Raio de giração correspondente.

A Figura 2.1 indica o coeficiente de flambagem.

Figura 2.1- Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas				
		Rotação livre, translação impedida				
		Rotação impedida, translação livre				
		Rotação e translação livres				

Fonte: Tabela E.1 da ABNT NBR 8800 (2008).

Para o dimensionamento de barras à flexão, é necessário determinar quais esforços internos solicitantes atuam na barra, além do momento fletor. A flexão em barras pode ser classificada como: flexão pura, que pode ser dividida em plana e oblíqua, flexão composta e flexão simples, sendo a última, o objeto central de estudo. Na flexão simples, tem-se como esforço interno solicitante apenas o momento fletor e a força cortante.

Conforme Pinheiro (2005, p. 79), “as barras de aço fletidas poderão ter as tensões internas variando do campo elástico ao campo plástico”, logo, pode-se classificar as seções transversais das vigas quanto à flambagem local, sendo:

Classe 1 – Seções Supercompactas: neste caso, tem-se seções que permitem que seja atingido o momento de plastificação (M_{pl}) e a subsequente redistribuição de momentos fletores. Portanto, deve-se utilizar a Equação 2.4.

$$M_n = M_{pl} = Z * f_y \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Sendo:

M_n = Momento nominal;

M_{pl} = Momento de plastificação;

Z = Módulo de resistência plástico;

f_y = Resistência ao escoamento do aço.

Classe 2 – Seções Compactas: neste caso, tem-se seções que permitem que seja atingido o momento de plastificação (M_{pl}) mas não a redistribuição de momentos fletores. Não há garantia de sustentar o momento fletor quando este, após atingir o M_{pl} , aumenta o ângulo de rotação ϕ .

$$M_n = (\text{Eq. 2.4})$$

Classe 3 – Seções Semicompactas: neste caso, tem-se seções cujos elementos componentes não sofrem flambagem local no regime elástico podendo, entretanto, sofrer flambagem inelástica. Portanto, deve-se utilizar a Equação 2.5.

$$M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Onde: λ_r = valor de λ para o qual $M_{cr} = M_r$.

Sendo:

M_r = Momento fletor correspondente ao início do escoamento;

M_{cr} = Momento fletor de flambagem elástica.

Classe 4 – Seções Esbeltas: neste caso, tem-se seções cujos elementos componentes podem sofrer flambagem no regime elástico. Portanto, deve-se utilizar a Equação 2.6.

$$M_n = M_{cr} = W * f_{cr} \text{ (Eq. 2.6)}$$

Onde:

M_{cr} = Momento fletor de flambagem elástica;

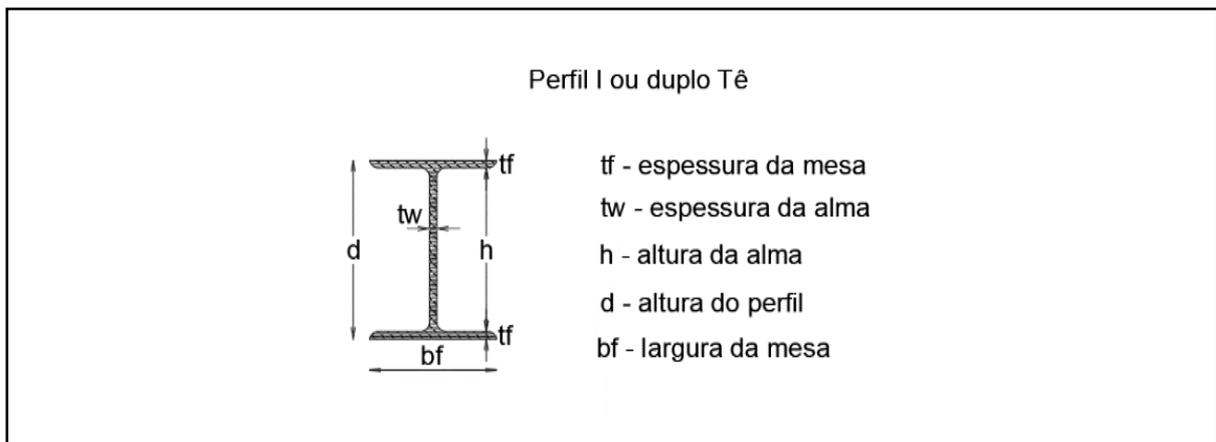
W = Módulo resistente elástico da seção;

f_{cr} = Tensão crítica.

Existe um caso especial de estruturas que pode ter suas reações de apoio e seus esforços internos determinados apenas por condições de equilíbrio. Em tais estruturas, chamadas estruturas estaticamente determinadas ou estruturas isostáticas, o número de vínculos externos e internos se iguala ao número de condições de equilíbrio (MARTHA, 2005, p. 39).

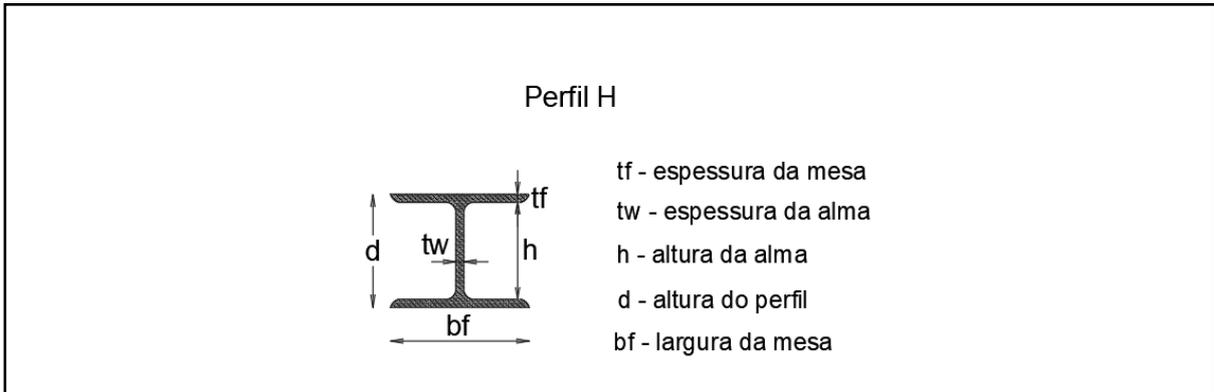
Diante dos conhecimentos prévios abordados, deve-se verificar qual a menor resistência da viga levando em conta a Flambagem Local da Alma (FLA), Flambagem Local da Mesa (FLM) e a Flambagem Lateral com Torção (FLT). Neste trabalho, será abordado o perfil I e o perfil H, conforme já mencionado. Para isso, é necessário conhecer as características geométricas de cada perfil, apresentadas nas Figuras 2.2 e 2.3, antes de fazer as devidas verificações.

Figura 2.2 - Perfil I ou duplo Tê



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 2.3 - Perfil H



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para a verificação da FLA, deve-se calcular o parâmetro de esbeltez da alma (Equação 2.7), e compará-lo com os limites para as classes de seção (Equação 2.8 e 2.9).

$$\lambda_a = \frac{h}{t_w} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Sendo:

λ_a = Parâmetro de esbeltez da alma;

h = Altura da alma;

t_w = Espessura da alma.

$$\lambda_{pa} = 3,5 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Sendo:

λ_{pa} = Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas;

E = Módulo de elasticidade do aço;

f_y = Resistência ao escoamento do aço.

$$\lambda_{ra} = 5,6 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Sendo:

λ_{ra} = Parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas;

E = Módulo de elasticidade do aço;

f_y = Resistência ao escoamento do aço.

O próximo passo é determinar o momento nominal, caso ($\lambda_a \leq \lambda_{pa}$), a viga é compacta quanto à alma, portanto deve-se adotar:

$$M_{na} = (\text{Eq. 2.4})$$

Caso ($\lambda_{pa} < \lambda_a \leq \lambda_{ra}$), a viga é semicompacta quanto à alma, logo:

$$M_{na} = (\text{Eq. 2.5})$$

Caso ($\lambda_a > \lambda_{ra}$), a viga é esbelta quanto à alma, logo deve-se verificar a condição limite por meio da Equação 2.10.

$$\lambda_a < \lambda_{m\acute{a}x} = \frac{0,48 * E}{\sqrt{f_y * (f_y + 115)}} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Portanto, deve-se verificar, para o escoamento da mesa tracionada, a Equação 2.11.

$$M_{na} = W_{xt} * k_{pg} * f_y \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Sendo:

M_{na} = Momento nominal da alma;

W_{xt} = Módulo de resistência elástica do lado tracionado;

k_{pg} = Parâmetro para dimensionamento de vigas esbeltas;

f_y = Resistência ao escoamento do aço.

Para a flambagem, tem-se a Equação 2.12.

$$M_{na} = W_{xc} * k_{pg} * f_{cr} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Sendo:

M_{na} = Momento nominal da alma;

W_{xc} = Módulo de resistência elástica do lado comprimido;

k_{pg} = Parâmetro para dimensionamento de vigas esbeltas;

f_{cr} = Tensão crítica.

Para a verificação da FLM, deve-se calcular o parâmetro de esbeltez da mesa (Equação 2.13), e compará-lo com os limites para as classes de seção. Tais limites, são calculados por meio das Equações 2.14, 2.15 e 2.16.

$$\lambda_m = \frac{b_f/2}{t_f} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Sendo:

λ_m = Parâmetro de esbeltez da mesa;

b_f = Largura da mesa;

t_f = Espessura da mesa.

$$\lambda_{pm} = 0,38 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Sendo:

λ_{pm} = Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas;

E = Módulo de elasticidade do aço;

f_y = Resistência ao escoamento do aço.

Para perfis soldados, deve-se adotar a Equação 2.15.

$$\lambda_{rm} = 0,62 * \sqrt{\frac{E}{(f_y - f_r)}} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Para perfis laminados, deve-se adotar a Equação 2.16.

$$\lambda_{rm} = 0,82 * \sqrt{\frac{E}{(f_y - f_r)}} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

Sendo:

λ_{rm} = Parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas;

f_r = Tensão residual.

O próximo passo é determinar o momento nominal, caso ($\lambda_m \leq \lambda_{pm}$), a viga é compacta quanto à mesa, portanto deve-se adotar:

$$M_{nm} = (\text{Eq. 2.4})$$

Caso ($\lambda_{pm} < \lambda_m \leq \lambda_{rm}$), a viga é semicompacta quanto à mesa, logo:

$$M_{nm} = (\text{Eq. 2.5})$$

Caso ($\lambda_m > \lambda_{rm}$), a viga é esbelta quanto à mesa, portanto, para perfis soldados, deve-se adotar a Equação 2.17.

$$M_{nm} = M_{cr} = \frac{0,38 * E}{\lambda_{m^2}} * W_c \quad (\text{Eq. 2.17})$$

Para perfis laminados, deve-se adotar a Equação 2.18.

$$M_{nm} = M_{cr} = \frac{0,67 * E}{\lambda_{m^2}} * W_c \quad (\text{Eq. 2.18})$$

Sendo:

M_{cr} = Momento fletor de flambagem elástica;

E = Módulo de elasticidade do aço;

λ_{rm} = Parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas;

W_c = Módulo resistente elástico de compressão, relativo ao eixo de flexão.

Para a FLT, inicialmente verifica-se se essa pode ocorrer. Caso a distância entre travamentos, denominada L_b , for igual a 0, não há possibilidade de ocorrência de flambagem lateral com torção. É o caso típico de vigas continuamente travadas. Para os demais casos, deve-se calcular inicialmente o parâmetro de esbeltez da FLT, por meio da Equação 2.19.

$$\lambda_{lt} = \frac{L_b}{r_y}; \quad \lambda_{máx} \leq 200 \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Sendo:

λ_{lt} = Parâmetro de esbeltez;

L_b = Maior distância entre travamentos;

r_y = Raio de giração em torno do eixo Y.

Em seguida, deve-se comparar com os limites para as classes de seção. Para os perfis adotados nesse trabalho, que possuem 2 eixos de simetria, o resultado obtido na Equação 2.19 deve ser comparado com os resultados obtidos nas Equações 2.20 e 2.21.

$$\lambda_{plt} = 1,75 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{Eq. 2.20})$$

Onde:

λ_{plt} = Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas;

E = Módulo de elasticidade do aço;

f_y = Resistência ao escoamento do aço.

$$\lambda_{r1t} = \frac{0,707 * C_b * \beta_1}{M_{r1t}} * \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{4 * \beta_2 * M_{r1t}^2}{C_b^2 * \beta_1^2}}} \quad (\text{Eq. 2.21})$$

As variáveis presentes na Equação 2.21, podem ser calculadas por meio das Equações 2.22, 2.23 e 2.24. As Equações 2.25 e 2.26, determinam parâmetros utilizados nas Equações 2.23 e 2.24.

$$M_{r1t} = (f_y - f_r) * W_c \quad (\text{Eq. 2.22})$$

$$\beta_1 = \pi * \sqrt{G * E} * \sqrt{I_t * A_g} \quad (\text{Eq. 2.23})$$

$$\beta_2 = 6,415 * \frac{A_g * (d - t_f)^2}{I_t} \quad (\text{Eq. 2.24})$$

$$G = 0,385 * E \quad (\text{Eq. 2.25})$$

$$I_t = \sum \frac{b * t^3}{3} \quad (\text{Eq. 2.26})$$

Sendo:

$C_b = 1,0$;

f_r = Tensão residual (115 Mpa);

W_c = Módulo resistente elástico de compressão, relativo ao eixo de flexão;

G = Módulo de elasticidade transversal do aço;

A_g = Área bruta;

d = Altura externa da seção;

I_t = Momento de inércia à torção;

b = largura;

t = espessura.

O próximo passo é determinar o momento nominal, caso ($\lambda_{lt} \leq \lambda_{plt}$), a viga possui elementos compactos, portanto deve-se adotar:

$$M_{nlt} = \text{(Eq. 2.4)}$$

Caso ($\lambda_{plt} < \lambda_{lt} \leq \lambda_{rlt}$), a viga possui elementos semicompactos, logo:

$$M_{nlt} = \text{(Eq. 2.5)}$$

Caso ($\lambda_{lt} > \lambda_{rlt}$), a viga possui elementos esbeltos, portanto, deve-se adotar a Equação 2.27.

$$M_{nlt} = M_{cr} = \frac{C_b * \beta_1}{\lambda_{lt}} * \sqrt{1 + \frac{\beta_2}{\lambda_{lt}^2}} \text{ (Eq. 2.27)}$$

Em vigas, ainda é necessário verificar a flecha atuante devido ao carregamento e máxima flecha permitida por Norma. Segundo a NBR 8800/2008 (Tabela C.1), para vigas de piso, temos deslocamentos máximos, conforme a Equação 2.28.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{350} \text{ (Eq. 2.28)}$$

Sendo:

L = Vão teórico entre os apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço

No caso de vigas biapoiadas, com carregamento uniformemente distribuído, a flecha resultante é dada pela Equação 2.29.

$$\delta = \frac{5}{384} * \frac{q * L^4}{E * I} \text{ (Eq. 2.29)}$$

Sendo:

q = Carregamento atuante;

E = Módulo de elasticidade;

I = Momento de Inércia em torno do eixo flexionado.

No caso de vigas sujeitas à força normal, deve-se fazer a verificação da resistência ao cisalhamento. Inicialmente, calcula-se o parâmetro de esbeltez da alma conforme (Eq. 7). Em seguida, compara-se com as Equações 2.30 e 2.31.

$$\lambda_{pv} = 1,08 * \sqrt{\frac{k * E}{f_y}} \quad (\text{Eq. 2.30})$$

$$\lambda_{rv} = 1,40 * \sqrt{\frac{k * E}{f_y}} \quad (\text{Eq. 2.31})$$

Os valores de k são determinados em função da disposição dos enrijecedores transversais. Esses que, são elementos inseridos na viga, por exemplo, em locais de ocorrência de esforços cisalhantes com o intuito de combatê-los. Sendo “ a ” a distância entre enrijecedores transversais, o “ k ” é calculado por meio das Equações 2.32, 2.33 e 2.34, para cada caso em específico.

$$k = 4 + \frac{5,34}{(a/h)^2}; \text{ Caso “} a/h < 1,0 \text{” (Eq. 2.32)}$$

$$k = 5,34 + \frac{4}{(a/h)^2}; \text{ Caso “} 1,0 \leq a/h < 3,0 \text{” (Eq. 2.33)}$$

$$k = 5,34; \text{ Para “} a/h > 3,0 \text{” ou caso não se tenha enrijecedores transversais. (Eq. 2.34)}$$

Em seguida, deve-se calcular a resistência nominal à força cortante. Para análise elástica, temos a Equação 2.35.

$$V_{pl} = 0,6 * A_w * f_y \quad (\text{Eq. 2.35})$$

Para análise plástica, temos a Equação 2.36.

$$V_{pl} = 0,55 * A_w * f_y \quad (\text{Eq. 2.36})$$

Onde:

A_w = Área efetiva de cisalhamento;

f_y = Resistência ao escoamento do aço.

Caso ($\lambda_a \leq \lambda_{pv}$), a viga é compacta quanto à resistência ao cisalhamento, portanto deve-se adotar a Equação 2.37.

$$V_n = V_{pl} \text{ (Eq. 2.37)}$$

Caso ($\lambda_{pv} < \lambda_a \leq \lambda_{rv}$), a viga é semicompacta quanto à resistência ao cisalhamento. Deve-se adotar a Equação 2.38.

$$V_n = \frac{\lambda_{pv}}{\lambda_a} * V_{pl} \text{ (Eq. 2.38)}$$

Caso ($\lambda_a > \lambda_{rv}$), a viga é esbelta quanto à resistência ao cisalhamento. Deve-se adotar a Equação 2.39.

$$V_n = 1,28 * \left(\frac{\lambda_{pv}}{\lambda_a}\right)^2 * V_{pl} \text{ (Eq. 2.39)}$$

A carga crítica de uma viga, será a menor carga encontrada dentre as verificadas anteriormente. Ressalta-se que para transformar os momentos nominais em momentos de projeto, multiplica-se o primeiro por um coeficiente de resistência “ $\phi = 0,9$ ”. Deve-se repetir o procedimento citado para transformar a resistência nominal à força cortante em resistência de cálculo.

Tendo os momentos de projeto e a resistência de cálculo de alma à força cortante, o último passo para determinar as cargas máximas em vigas isostáticas biapoiadas, será:

Para os momentos de projeto (Equação 2.40):

$$\text{Carga máxima “}q\text{”} = \frac{8 * M}{L^2} \text{ (Eq. 2.40)}$$

Sendo:

M = Momento de projeto;

L = Vão teórico.

Para a resistência de cálculo de alma à força cortante (Equação 2.41):

$$\text{Carga máxima “}q\text{”} = \frac{2 * V}{L} \text{ (Eq. 2.41)}$$

Sendo:

V = Resistência de cálculo de alma à força cortante;

$L =$ Vão teórico.

2.2. Estruturas de madeira

A madeira, de modo geral, possui uma ótima relação resistência/peso quando confrontada a outros materiais de construção. Essa característica, extremamente relevante no âmbito estrutural, faz com que o material seja amplamente utilizado, seja como elemento principal ou até mesmo como apoio para as estruturas.

As madeiras, podem ser classificadas em duas categorias principais: madeiras duras, provenientes de dicotiledôneas, e madeiras macias, provenientes de modo geral, das coníferas. Para determinar aspectos de dimensionamento, é necessário conhecer, previamente, propriedades inerentes ao material. Segundo Pfeil e Pfeil (2003), devido à orientação das células, a madeira é um material anisotrópico, apresentando três direções principais: longitudinal, radial e tangencial. Na prática, é comum caracterizar apenas as propriedades na direção das fibras principais (direção longitudinal) e na direção perpendicular às mesmas fibras.

A variação da resistência mecânica das madeiras está relacionada a três fatores principais: umidade, tempo de duração da carga e a presença de defeitos. Quanto maior a umidade da madeira ou o tempo de duração da carga, menor será a sua resistência, ao passo que, a ocorrência de defeitos reduzirá também a resistência desse material.

O foco do dimensionamento será a madeira serrada, sendo essa amplamente e majoritariamente usada, além de ser a mais empregada no Brasil. Deve-se ressaltar, que se tratando da madeira, outros produtos podem ser empregados, como: madeira bruta ou roliça, falquejada, compensada, recomposta, laminada e colada etc.

Por se tratar de um material anisotrópico, a resistência das madeiras é descrita por diversos parâmetros, tais como: Compressão paralela e normal às fibras, tração paralela e normal às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, embutimento paralelo e normal às fibras, módulo de elasticidade na compressão normal e paralela às fibras, densidade básica.

As propriedades mecânicas referentes à madeira, são obtidas em laboratório para cada espécie, obtendo-se uma curva de distribuição normal, que será utilizada para calcular a resistência característica do material. No Brasil, define-se a resistência característica f_k como sendo aquela que é inferior a 95% do universo amostral. O valor de f_k pode ser calculado por meio da Equação 2.42.

$$f_k = f_m * (1 - 1,645 * \delta) \text{ (Eq. 2.42)}$$

Sendo:

f_k = Resistência característica;

f_m = Resistência média;

δ = Coeficiente de variação.

Os coeficientes de variação para as principais propriedades mecânicas, podem ser encontrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Coeficientes de variação

Propriedade medida em ensaios	Coeficiente de Variação (δ)	f_k / f_m
Resistência à flexão (f_m)	16%	0,74
Módulo de elasticidade (E)	22%	0,64
Resistência à compressão paralela às fibras (f_c)	18%	0,70
Resistência à compressão perpendicular às fibras (f_{cn})	28%	0,54
Resistência ao cisalhamento (f_v)	14%	0,77
Peso específico (γ)	10%	0,84

Fonte: Tabela 3.1, ASTM D2555 (1992) *apud* Estruturas de Madeira (2003).

As propriedades mecânicas devem ser determinadas, preferencialmente, em função do coeficiente de variação. Em caso de outras propriedades, é possível determinar por meio das correlações apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Relações entre valores característicos de tensões resistentes

$f_{c,k} / f_{t,k}$	0,77
$f_{M,k} / f_{t,k}$	1,00
$f_{cn,k} / f_{c,k}$	0,25
$f_{v,k} / f_{c,k}$ (coníferas)	0,15
$f_{v,k} / f_{c,k}$ (dicotiledóneas)	0,12

Fonte: Tabela 3.2, Estruturas de Madeira (2003).

Sendo:

$f_{c,k}$ = Resistência à compressão paralela às fibras característica;

$f_{t,k}$ = Resistência à tração paralela às fibras característica;

$f_{v,k}$ = Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras característico;

$f_{cn,k}$ = Resistência à compressão normal às fibras característico;

$f_{M,k}$ = Resistência média à tração, medida no ensaio de flexão de peça retangular

admitindo diagrama linear de tensões.

Acerca dos fatores que influenciam as propriedades mecânicas das madeiras, é de conhecimento teórico que, quando a peça é cortada essa tem cerca de 30% de umidade e esse valor diminui até entrar em equilíbrio com o ar. O processo de selagem ao ar pode levar anos. Contudo, o emprego de estufas pode reduzir drasticamente esse tempo.

No Brasil, entende-se que a umidade de equilíbrio com o ar é de 12%. Normalmente são utilizadas tabelas de resistência de madeiras para realizar o dimensionamento da estrutura, tabelas que por sua vez apresentam valores para a umidade citada. No entanto, caso seja necessário realizar transformações para umidades de equilíbrio distintas, pode-se utilizar as Equações 2.43 e 2.44.

$$f_{12} = f_u * [1 + \frac{3}{100} * (u - 12)] \text{ (Eq. 2.43)}$$

Sendo:

f_{12} = Tensão resistente à 12% de umidade;

f_u = Tensão resistente na umidade u (%);

u = Umidade (%) de referência da tabela consultada.

$$E_{12} = E_u * [1 + \frac{2}{100} * (u - 12)] \text{ (Eq. 2.44)}$$

Sendo:

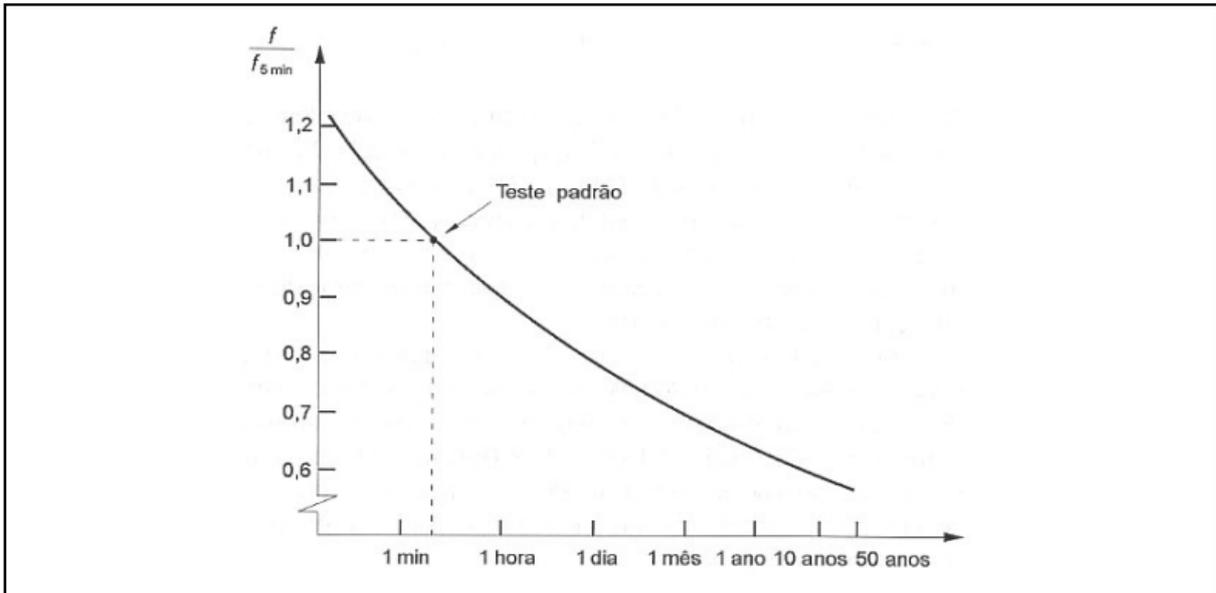
E_{12} = Módulo de elasticidade à 12% de umidade;

E_u = Módulo de elasticidade na umidade u (%);

u = Umidade (%) de referência da tabela consultada.

As madeiras apresentam sensibilidade em relação ao tempo de aplicação da carga, conforme já mencionado. Suas propriedades são determinadas para uma carga aplicada com duração de 5 minutos. Contudo, no gráfico da Figura 2.4, observa-se uma variação na resistência mecânica desse elemento.

Figura 2.4 - Variação da resistência



Fonte: Figura 3.11, Estruturas de Madeira (2003).

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), “para viabilizar a utilização da madeira em sistemas estruturais é necessário classificar as peças em categorias de acordo com a incidência de defeitos”, visto que é muito grande a influência de tais defeitos sobre a resistência do material. As madeiras devem ser inspecionadas por parte de técnico habilitado de modo a classificar as peças em 1ª categoria, onde se tem baixa ocorrência de defeitos, e 2ª categoria, peças com significativa presença de defeitos. Em caso da não classificação de tais peças, deve-se considerar que essas são de 2ª categoria.

2.2.1 Aspectos do pré-dimensionamento

Para as verificações necessárias ao cálculo estrutural, o método de dimensionamento adotado nesta seção será o dos estados limites últimos, conforme descrito no item 2.1.1. Para atender esse método, o resultado da combinação de diferentes ações que atuam na estrutura, denominado S_d , deverá ser menor ou igual à resistência de projeto R_d . A resistência de projeto pode ser determinada pela Equação 2.45.

$$R_d = \frac{k_{mod} * R_{nk}}{\gamma_w} \quad (\text{Eq. 2.45})$$

Sendo:

R_{nk} = Resistência característica do material;

γ_w = Coeficiente de minoração da resistência para madeira;

k_{mod} = Coeficiente que soma os efeitos da umidade, tempo de duração do carregamento e ocorrência de defeitos.

Para determinar o coeficiente k_{mod} , deve-se somar o k_{mod1} , k_{mod2} e k_{mod3} . Esses coeficientes podem ser definidos com base nas Tabelas 2.3 e 2.4.

Tabela 2.3 – Valores de k_{mod1}

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada Madeira laminada colada 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: Tabela 10, ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 2.4 – Valores de k_{mod2}

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

Fonte: Tabela 11, ABNT NBR 7190 (1997).

O coeficiente parcial de modificação k_{mod3} leva em consideração se a madeira é de primeira ou segunda categoria. No caso de madeira de segunda categoria, admite-se $k_{mod3} = 0,8$ e no caso de primeira categoria, $k_{mod3} = 1,0$. As classes de umidade são determinadas em função da umidade presente na região, conforme a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Classes de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}
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: Tabela 7, ABNT NBR 7190 (1997).

O elemento estrutural de madeira a ser discutido neste trabalho, será a viga. Segundo Pfeil e Pfeil (2003), “as vigas estão sujeitas a tensões normais de tração e compressão longitudinais e, portanto, na direção paralela às fibras. Nas regiões de aplicação de carga, como por exemplo nos apoios, estão submetidas a tensões de compressão normal às fibras”. Na direção normal e paralela às fibras, temos atuação das tensões cisalhantes.

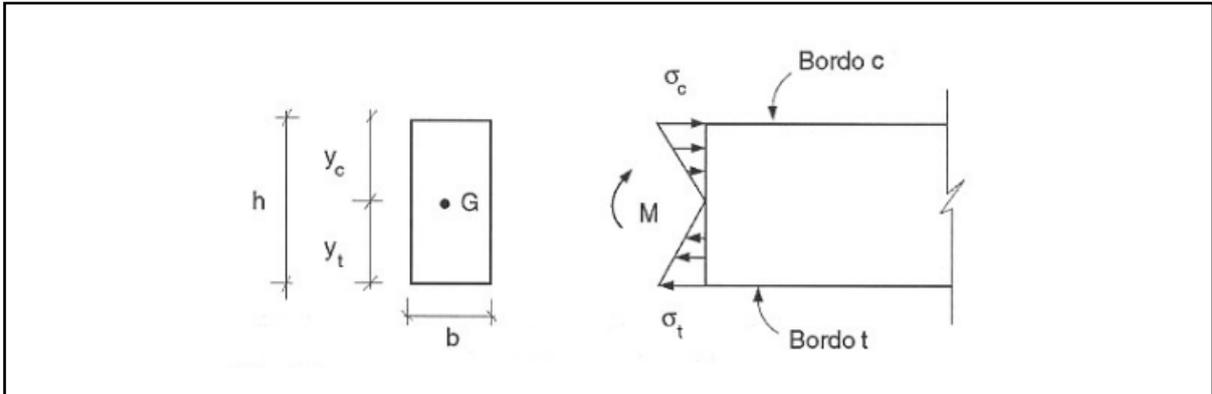
Ainda, as vigas altas e esbeltas podem sofrer flambagem lateral, provocando instabilidade e fazendo com que a viga perca seu equilíbrio no plano principal de flexão e passe a apresentar deslocamentos laterais e rotação de torção. A ocorrência desse fenômeno pode ser evitada provendo-se à viga pontos intermediários de contenção lateral (PFEIL; PFEIL, 2003).

As formulações que serão apresentadas neste trabalho, são para vigas biapoiadas, isostáticas, com carregamento uniformemente distribuído e tendo como tipo construtivo a madeira serrada. Para outras condições basta utilizar as equações adequadas ao cálculo das propriedades geométricas das figuras planas, reações de apoio, momentos, esforços e deflexões.

2.2.1.1 Verificação da compressão e da tração paralela às fibras

As peças flexionadas apresentam parte de sua seção transversal submetida à tração e parte submetida à compressão (Figura 2.5):

Figura 2.5 - Tensões normais em vigas



Fonte: Figura 6.5, Estruturas de Madeira (2003).

As máximas tensões nos bordos comprimidos e traçados são calculadas, para seções genéricas, pelas Equações 2.46 e 2.47.

$$\sigma_{td} = \frac{M_d}{W_t} \quad (\text{Eq. 2.46})$$

$$\sigma_{cd} = \frac{M_d}{W_c} \quad (\text{Eq. 2.47})$$

Sendo:

M_d = Momento de projeto;

W_t, W_c = Módulos de resistência à flexão referidos aos bordos traçado e comprimido da seção, respectivamente.

Considerando uma seção retangular de base b e altura h , e ainda, atendendo a condição prevista no método dos estados limites últimos, temos as Equações 2.48 e 2.49.

$$\frac{6 * M_d}{b * h^2} \leq f_{cd} \quad (\text{Eq. 2.48})$$

$$\frac{6 * M_d}{b * h^2} \leq f_{td} \quad (\text{Eq. 2.49})$$

Sendo f_{cd} e f_{td} , tensões resistentes de projeto à compressão e à tração paralela às fibras, respectivamente.

2.2.1.2 Verificação da compressão normal às fibras

Na região de contato da viga com o seu apoio deve-se verificar se a tensão de compressão normal às fibras não supera a resistência da madeira nesse mesmo parâmetro. Deve-se verificar a condição descrita na Equação 2.50.

$$\sigma_{cnd} = \frac{R_d}{b * c} \leq f_{cnd} = 0,25 * f_{cd} \quad (\text{Eq. 2.50})$$

Sendo:

σ_{cnd} = Tensão de compressão normal às fibras;

R_d = Reação de projeto;

b, c = Dimensões da superfície de apoio;

f_{cnd} = Resistência da madeira à compressão normal às fibras.

2.2.1.3 Verificação do cisalhamento paralelo às fibras

Sendo a resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras muito maior que a mesma resistência na direção paralela, deve-se verificar, à fim de simplificar o processo de cálculo, apenas a última resistência citada. “As tensões de cisalhamento τ , em peças de altura constante solicitadas pelo esforço cortante V , são dadas pela conhecida fórmula de Resistência dos Materiais” (GERE; TIMOSHENKO, 1990 *apud* PFEIL; PFEIL, 2003, p. 98).

$$\tau = \frac{V * S}{b * I} \quad (\text{Eq. 2.51})$$

Sendo:

I = Momento de inércia da seção referido ao seu centro de gravidade;

b = Largura da seção no ponto de cálculo de τ ;

S = Momento estático referido ao centro de gravidade da seção, da parte da área da seção entre a borda e o ponto de cálculo τ .

Considerando uma seção retangular de base b e altura h , e ainda, atendendo a condição prevista no método dos estados limites últimos, temos a Equação 2.52, onde:

$$\frac{3}{2} * \frac{V}{b * h} \leq f_{vd} \quad (\text{Eq. 2.52})$$

Sendo V o esforço cortante.

2.2.1.4 Verificação da deflexão máxima

A verificação da deflexão máxima, conhecida como flecha, é uma verificação do estado limite de serviço. Para tanto, calcula-se a flecha máxima admissível, conforme previsto em norma, em função da finalidade estrutural em questão. Uma vez calculada a flecha admissível, calcula-se a flecha provocada pelo carregamento. A condição descrita é representada pela Equação 2.53.

$$\frac{5 * q_d * L^4}{384 * E * I} \leq \delta_{max} \text{ (Eq. 2.53)}$$

Sendo:

δ_{max} = Flecha máxima admissível;

q_d = Carga distribuída de projeto;

L = Vão teórico;

E = Módulo de elasticidade característico do material;

I = Momento de inércia da seção transversal.

2.2.1.5 Verificação da Flambagem Lateral com Torção (FLT)

Em determinadas condições, podemos observar a ruptura por flambagem lateral com torção, onde, simultaneamente observamos o deslocamento lateral da viga e a rotação de sua seção transversal. Ainda, a FLT deve ser verificada apenas quando sua ocorrência for possível. Dispensa-se a verificação de tensões de flexão com flambagem lateral nos casos em que a Equação 2.54 for cumprida:

$$\frac{l_1}{b} \leq \frac{E_{c,ef}}{\beta_m * f_{cd}} \text{ (Eq. 2.54)}$$

Sendo:

l_1 = Distância entre pontos de contenção lateral;

b = Largura da viga;

β_m = Fator da flambagem lateral com torção;

f_{cd} = Tensão resistente de projeto à compressão;

$E_{c,ef}$ = Módulo de elasticidade efetiva.

Os valores de β_m são calculados em função da relação h/b da seção transversal da peça, por meio da Equação 2.55.

$$\beta_m = \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{\beta_e}{\gamma_f} * \frac{(h/b)^{\frac{3}{2}}}{[(h/b) - 0,63]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{Eq. 2.55})$$

A Tabela 2.6 apresenta os valores de β_m para diferentes relações h/b , considerando $\beta_e = 4,0$ e $\gamma_f = 1,4$.

Tabela 2.6 – Valores de β_m

h/b	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
β_m	6,0	8,8	12,3	15,9	19,5	23,1	26,7	30,3	34,0	37,6
h/b	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
β_m	41,2	44,8	48,5	52,1	55,8	59,4	63,0	66,7	70,3	74,0

Fonte: Tabela 16, ABNT NBR 7190 (1997).

Para os demais casos, pode-se verificar a FLT por meio da Equação 2.56.

$$\sigma_{cd} \leq \frac{E_{c,ef}}{(l_1/b) * \beta_m} \quad (\text{Eq. 2.56})$$

Sendo σ_{cd} disposta pela Equação 2.47.

2.2.2 Considerações finais

Assim como nas estruturas metálicas, a carga crítica será a menor carga encontrada dentre todas as calculadas anteriormente. É importante lembrar que o momento de projeto em vigas isostáticas biapoizadas, pode ser descrito como sugere a Equação 2.57.

$$M_d = \frac{q_d * L^2}{8} \quad (\text{Eq. 2.57})$$

Sendo:

M_d = Momento de projeto;

q_d = Carga distribuída de projeto;

L = Vão teórico.

Para a reação da cortante V nas mesmas condições, tem-se a Equação 2.58.

$$V = \frac{q * L}{2} \text{ (Eq. 2.58)}$$

Sendo:

q = Carga distribuída;

L = Vão teórico.

3. METODOLOGIA

Conforme (FLEURY; WERLANG, 2017, p.11), este trabalho trata de uma pesquisa aplicada, que para os autores, “concentra-se em torno dos problemas presentes nas atividades das instituições, organizações, grupos ou atores sociais. Ela está empenhada na elaboração de diagnósticos, identificação de problemas e busca de soluções”.

De forma sucinta, serão apresentadas as etapas necessárias para o desenvolvimento dos *softwares*, considerando que os conceitos e aplicações presentes em todo referencial teórico, estão relacionados com a metodologia de desenvolvimento de forma direta.

3.1. Concepção

O projeto de pesquisa em sua fase inicial, contará com a coleta de informações acerca do desenvolvimento de sistemas computacionais gráficos, emissão de relatórios e técnicas de programação orientada a objetos. Ainda na fase de planejamento ou concepção, serão realizadas pesquisas comerciais na cidade de Palmas – TO, para atingir um dos principais objetivos dos *softwares*, que é elaborar o orçamento da estrutura lançada.

O critério de escolha da referência comercial, usada no *Wooden Structures*, se baseia na maior variedade de espécies e seções que são fornecidas pelas empresas. Diante disso, as empresas escolhidas foram a “On Madeiras”, localizada em Palmas – TO, e a empresa “Risso Madeira & Construção”, por possuir um catálogo de preços virtual e de fácil acesso por meio do seu site. O *software* *Metallic Structures*, será alimentado pelos catálogos de perfis disponibilizados pela “ArcelorMittal”, um conglomerado industrial multinacional de empresas de aço, possuindo filial também na cidade de Palmas – TO.

3.2. Desenvolvimento

O desenvolvimento do sistema computacional, ao que se refere, consiste em uma aplicação direta do conteúdo teórico presente nesse trabalho, ainda, seguindo a ideologia presente na fase de planejamento. De forma estruturada, a primeira etapa do desenvolvimento será a própria criação/imaginação do ambiente de trabalho final do produto. Atribui-se à etapa de desenvolvimento uma relevância maior, dada sua implicação na tomada de decisões para que sejam atingidos todos os objetivos elencados.

O passo seguinte é a própria codificação do sistema, que reunirá todas as informações essenciais para o funcionamento do produto de forma plena. Ainda, existe uma etapa nessa divisão proposta pelo autor, que consiste na própria utilização do *software* de maneira repetitiva, sendo o objetivo aqui, inspecionar, testar, corrigir, melhorar o sistema, prezando sempre pela qualidade do *software* como produto destinado a comunidade.

3.2.1 Ambiente de desenvolvimento

Para efetuar a implantação dos sistemas propostos, foi preparado um ambiente de desenvolvimento baseado na série de especificações da linguagem Java. O sistema operacional utilizado foi o Windows 10 Pro de 64 bits, com um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), NetBeans IDE 8.0.1, responsável por depurar, executar e compilar todo o código fonte. As dependências necessárias para o desenvolvimento serão descritas na próxima subseção.

3.2.2 Técnicas

Por padrão, a linguagem de programação Java, possui inúmeras bibliotecas ou dependências que podem ser usadas para diferentes finalidades. No entanto, ao longo do desenvolvimento, com o intuito de agilizar a codificação, foram utilizadas algumas dependências externas, sendo essas: iTextPDF, na sua versão 5.5.9, JOGL 2.4.0 e Zip4j 1.3.1.

A biblioteca “iTextPDF”, escrita em Java e .NET é responsável por fornecer e integrar funcionalidades de PDF (*Portable Document Format*) na aplicação. Essa biblioteca é indispensável pelo fato dos relatórios gerados pelo sistema, apresentarem essa popular e universal extensão de arquivo.

A dependência JOGL é capaz de fornecer gráficos tridimensionais suportados por *hardware* para aplicativos escritos em Java, além de hospedar o desenvolvimento de ligação de gráficos de alto desempenho. Ainda, a biblioteca JOGL fornece acesso total às APIs nas especificações OpenGL 1.0 até 4.5. O OpenGL (*Open Graphics Library*) descrito, é uma API (*Application Programming Interface*) de gráficos multiplataforma utilizada na computação gráfica, para desenvolvimento de aplicativos gráficos, ambientes 3D, jogos etc. Essa API foi criada inicialmente como uma alternativa aberta e reproduzível ao Iris GL, que era a API gráfica proprietária nas estações de trabalho da Silicon Graphics, uma empresa norte-americana de soluções para computação de alto desempenho.

A outra biblioteca citada, “Zip4j” foi criada por Srikanth Reddy Lingala em 2008, e é responsável por manipular arquivos na extensão “.zip”. Essa extensão, bastante difundida, é um formato de compactação de arquivos que possibilita a organização e unificação de diversos ficheiros e diretórios. A implementação de tal ferramenta se justifica pelo fato da aplicação salvar as informações apresentadas pelo usuário em formato de arquivo.

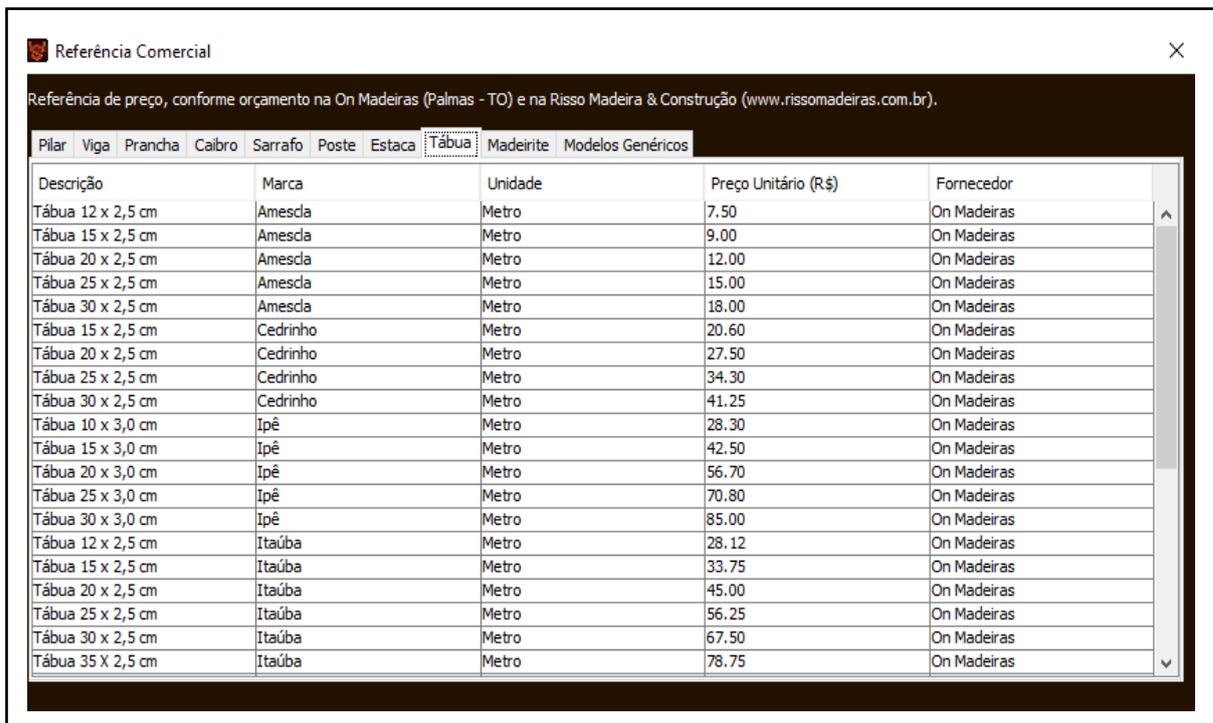
As diversas funcionalidades dos *softwares*, exclusive as citadas, foram desenvolvidas utilizando ferramentas e técnicas presentes na própria linguagem de programação, conhecidas popularmente como “nativas”. O “Java AWT Graphics” é um exemplo de classe nativa, muito utilizada para desenhar elementos bidimensionais.

3.2.3 Coleta de dados

Os insumos comerciais responsáveis por alimentar os *softwares*, foram obtidos por meio de tabelas e planilhas, disponibilizadas pelas empresas citadas. O passo seguinte, foi filtrar as informações, separando aspectos técnicos de aspectos comerciais. As informações técnicas como classes e resistências das espécies de madeira, foram obtidas pela ABNT NBR 7190 (1997). Já o software Metallic Structures, recebeu tanto aspectos técnicos quanto comerciais da empresa de aço, com o intuito de relacionar corretamente o preço e as dimensões dos perfis.

Na Figura 3.1, pode-se observar algumas referências de preços introduzidas no sistema Wooden Structures:

Figura 3.1 - Referência Comercial - Wooden Structures



Descrição	Marca	Unidade	Preço Unitário (R\$)	Fornecedor
Tábua 12 x 2,5 cm	Amescla	Metro	7.50	On Madeiras
Tábua 15 x 2,5 cm	Amescla	Metro	9.00	On Madeiras
Tábua 20 x 2,5 cm	Amescla	Metro	12.00	On Madeiras
Tábua 25 x 2,5 cm	Amescla	Metro	15.00	On Madeiras
Tábua 30 x 2,5 cm	Amescla	Metro	18.00	On Madeiras
Tábua 15 x 2,5 cm	Cedrinho	Metro	20.60	On Madeiras
Tábua 20 x 2,5 cm	Cedrinho	Metro	27.50	On Madeiras
Tábua 25 x 2,5 cm	Cedrinho	Metro	34.30	On Madeiras
Tábua 30 x 2,5 cm	Cedrinho	Metro	41.25	On Madeiras
Tábua 10 x 3,0 cm	Ipê	Metro	28.30	On Madeiras
Tábua 15 x 3,0 cm	Ipê	Metro	42.50	On Madeiras
Tábua 20 x 3,0 cm	Ipê	Metro	56.70	On Madeiras
Tábua 25 x 3,0 cm	Ipê	Metro	70.80	On Madeiras
Tábua 30 x 3,0 cm	Ipê	Metro	85.00	On Madeiras
Tábua 12 x 2,5 cm	Itaúba	Metro	28.12	On Madeiras
Tábua 15 x 2,5 cm	Itaúba	Metro	33.75	On Madeiras
Tábua 20 x 2,5 cm	Itaúba	Metro	45.00	On Madeiras
Tábua 25 x 2,5 cm	Itaúba	Metro	56.25	On Madeiras
Tábua 30 x 2,5 cm	Itaúba	Metro	67.50	On Madeiras
Tábua 35 X 2,5 cm	Itaúba	Metro	78.75	On Madeiras

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 3.2, pode-se observar as características e os aspectos técnicos das espécies, conforme apresentado na fundamentação teórica:

Figura 3.2 - Características das espécies do *software* - Wooden Structures

Classe	Nome Comum	Nome Científico	Fc0,k (MPa)	Ft0,k (MPa)	Fv0,k (MPa)	Ec0,med (MPa)	Pap 12% (Kg/m³)
D20	Amescla	Trattinnickia burs...	20	20	4	10000	500
D20	Caixeta	Simarouba amara	20	20	4	10000	500
D20	Cajueiro	Anacardium sp.	20	20	4	10000	500
D20	Cambará Rosa	Erismia sp.	20	20	4	10000	500
D20	Cedro Doce	Cedrela sp.	20	20	4	10000	500
D20	Cedro Amargo	Cedrela odorata	20	20	4	10000	500
D20	Cedrinho	Erismia sp.	20	20	4	10000	500
D20	Cedroarana	Cedrelinga catan...	20	20	4	10000	500
D20	Marupá	Simarouba sp.	20	20	4	10000	500
D30	Castanheira	Bertholletia excelsa	30	30	5	12000	625
D30	Cedro Amazonense	Cedrela sp.	30	30	5	12000	625
D30	Embireira	Guatteria sp.	30	30	5	12000	625
D30	Quarubarana	Erismia uncinatum	30	30	5	12000	625
D30	Tauari	Couratari sp.	30	30	5	12000	625
D30	Umirana	Qualea retusa	30	30	5	12000	625
D40	Abiú	Pouteria sp.	40	40	6	14500	750
D40	Angelim Amargoso	Vatairea fusca	40	40	6	14500	750
D40	Angelim Amargo	Vatairea speciosa	40	40	6	14500	750

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.2.4 Tomada de decisões

Ao longo do desenvolvimento dos softwares diversas decisões foram tomadas, tanto em aspectos de concepção e organização, quanto na parte técnica. Dito isso, será apresentado na sequência algumas dessas decisões, a fim de detalhar e complementar a pesquisa, principalmente para seu uso em trabalhos futuros.

A primeira definição no desenvolvimento dos softwares, após a configuração do ambiente e a escolha da linguagem de programação que será adotada, é elaborar uma lista de requisitos para determinada função. Nesse ponto, é importante compreender o uso de cada ferramenta da linguagem, e sua limitação, para que seja possível implantar a funcionalidade desejada.

A delimitação do escopo, descrita nesta pesquisa, foi o pontapé inicial para elaborar a lista de requisitos e criar as telas de interação dos *softwares*. Para a criação dessas telas, em alguns casos, é necessário adequar e simplificar certas formulações, já visando a conversão da linguagem e aspecto matemático para linguagem de programação. É importante ressaltar que no desenvolvimento de um *software*, não necessariamente, deve ser seguido o fluxograma principal de utilização do sistema pós-desenvolvimento.

Além das delimitações abordadas anteriormente, são destaques, as configurações dos pavimentos da estrutura, que ficaram restringidas em 10 pavimentos, visando diminuir o uso de variáveis que reservam espaço na memória do computador. Cada pavimento não contém apenas sua altura, descrição e nível, mas sim, inúmeros pontos que representam nós, para ligar os elementos estruturais. Na utilização do *software*, o usuário poderá criar uma estrutura com muitos pontos e diversos pavimentos, e caso não haja restrição, à medida que esse número aumentar de forma considerável, haverá lentidão na execução da aplicação. Por isso, diversos testes foram e devem ser realizados, quando se almeja uma aplicação com o melhor desempenho possível.

Outro ponto importante é definir as opções de configuração que o usuário final poderá utilizar. Em ambos os *softwares*, ferramentas indispensáveis para pré-dimensionar a estrutura foram implantadas, em conjunto com configurações simples de personalização. Mas, funções como ligações entre os elementos, visualização de deformação, inserção de informações provenientes de aplicativos externos, detalhamento de elementos, entre outras funções que são convenientes em programas de dimensionamento não foram desenvolvidas.

No sistema *Wooden Structures*, o coeficiente de modificação k_{mod} foi desenvolvido como uma variável ajustável pelo usuário. Sendo assim, o utilizador do sistema pode definir esse parâmetro conforme sua necessidade. Para auxiliar o usuário, são apresentadas telas com as tabelas citadas na fundamentação teórica contendo os valores para cada classe de umidade, tipo de madeira e classe de carregamento.

Em relação as características dos elementos, constam no *software* todas as espécies presentes na norma técnica de projeto de estruturas de madeira. Além disso, o usuário poderá inserir modelos genéricos com suas próprias especificações. A seção mínima que será calculada no relatório final segue as seções comumente utilizadas no mercado. Ainda, o usuário final poderá inserir referências comerciais próprias, e utilizá-las para pré-dimensionar sua estrutura.

A metodologia de cálculo da estrutura composta por pilares e vigas, segue o roteiro de dimensionamento citado na revisão bibliográfica. Uma análise importante, é que tais

verificações são para elementos isolados, e para realizar o pré-dimensionamento conjunto da estrutura, foram definidos aspectos de carregamentos que serão abordados nos resultados e análises.

O *software* Metallic Structures segue a mesma linha de raciocínio do Wooden Structures. Os pavimentos contêm as mesmas restrições, e o usuário final pode alimentar o programa com seu próprio perfil metálico, desde que, dentro das delimitações previstas na introdução.

Ainda sobre os perfis metálicos e suas características, foram inseridos no sistema os perfis I disponibilizados pela ArcelorMittal e os perfis laminados I e H presentes na bibliográfica de referência, “Estruturas metálicas”, do doutor Antonio Carlos da Fonseca Bragança Pinheiro. Assim como no Wooden Structures, referências comerciais próprias podem ser inseridas pelo usuário.

Quanto aos tipos de aço, poderão ser usados exclusivamente os tipos mais comuns para estruturas usuais, sendo esses: ASTM A242 Grupos 1 e 2, ASTM A242 Grupo 3, ASTM A36, ASTM A441 Grupos 1 e 2, ASTM A441 Grupo 3, ASTM A570 Grau 33, ASTM A570 Grau 40, ASTM A570 Grau 45, ASTM A572 Grau 42, ASTM A572 Grau 50, ASTM A588, NBR AR-290, NBR AR-345, NBR AR-COR-345A, NBR AR-COR-345B e NBR MR-250.

Por fim, uma ideia de implementação em trabalhos futuros e atualizações dos softwares, é permitir outras configurações e personalizações, como catálogos de diversos fornecedores, uma gama maior de perfis, dimensionamento de ligações, entre outros.

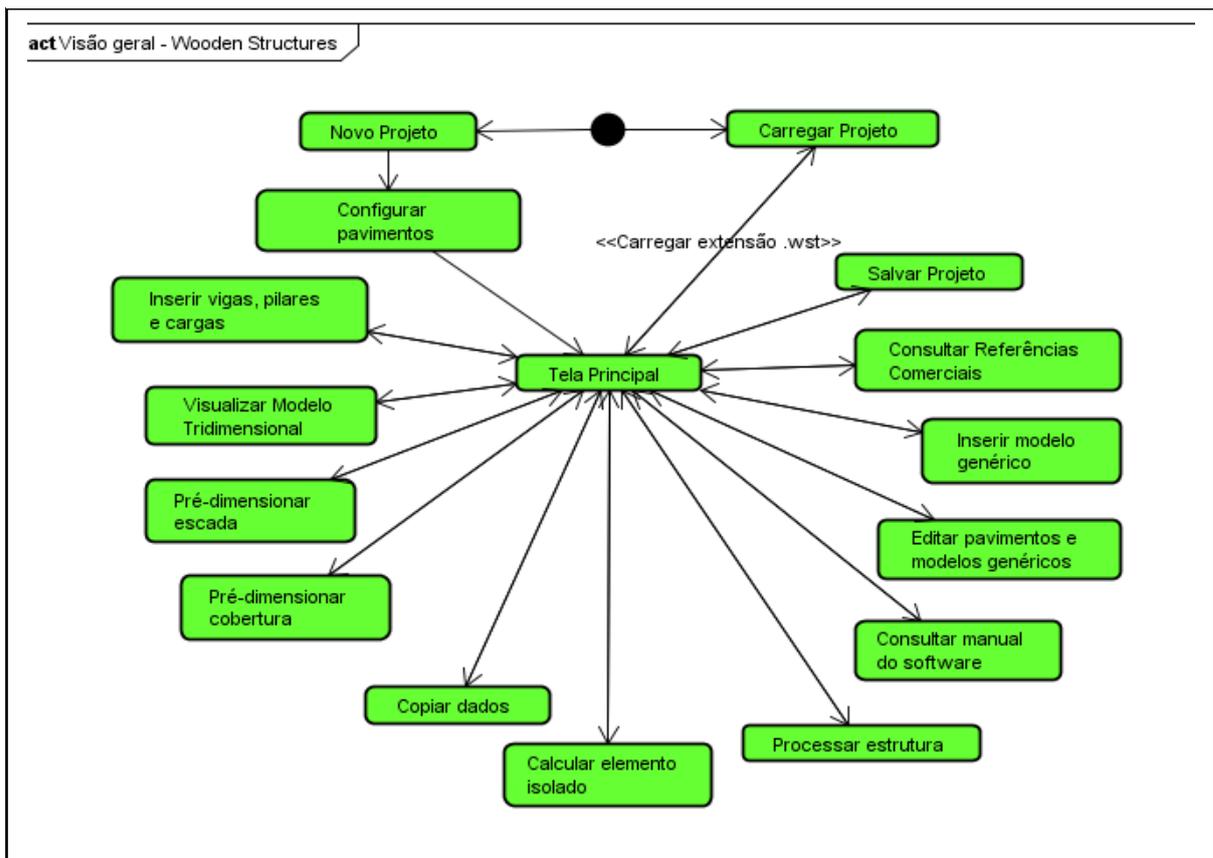
4. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo se dedica aos resultados obtidos durante e após o desenvolvimento dos *softwares* Wooden Structures e Metallic Structures. São apresentadas telas capturadas de determinadas funcionalidades dos sistemas, com a finalidade de expor as técnicas utilizadas e também mostrar a praticidade de manuseio do *software*.

4.1. Wooden Structures

Na figura 4.1, é possível obter através de um diagrama, uma visão geral das funcionalidades implantadas no Wooden Structures, e a relação entre essas.

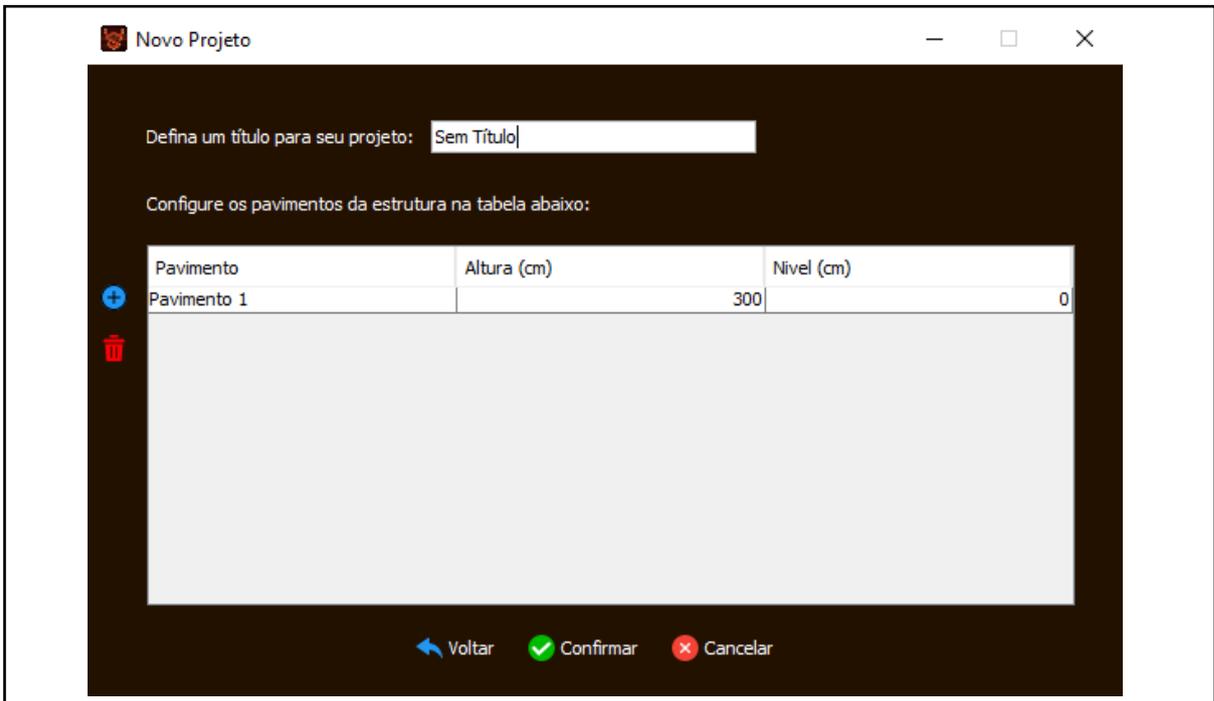
Figura 4.1 - Diagrama das funcionalidades - Wooden Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A ideia central de execução do software é, inicialmente, definir os pavimentos, com altura e nível, para que essa informação seja utilizada posteriormente no cálculo de carga dos pilares. A Figura 4.2 demonstra a tela de configuração dos pavimentos:

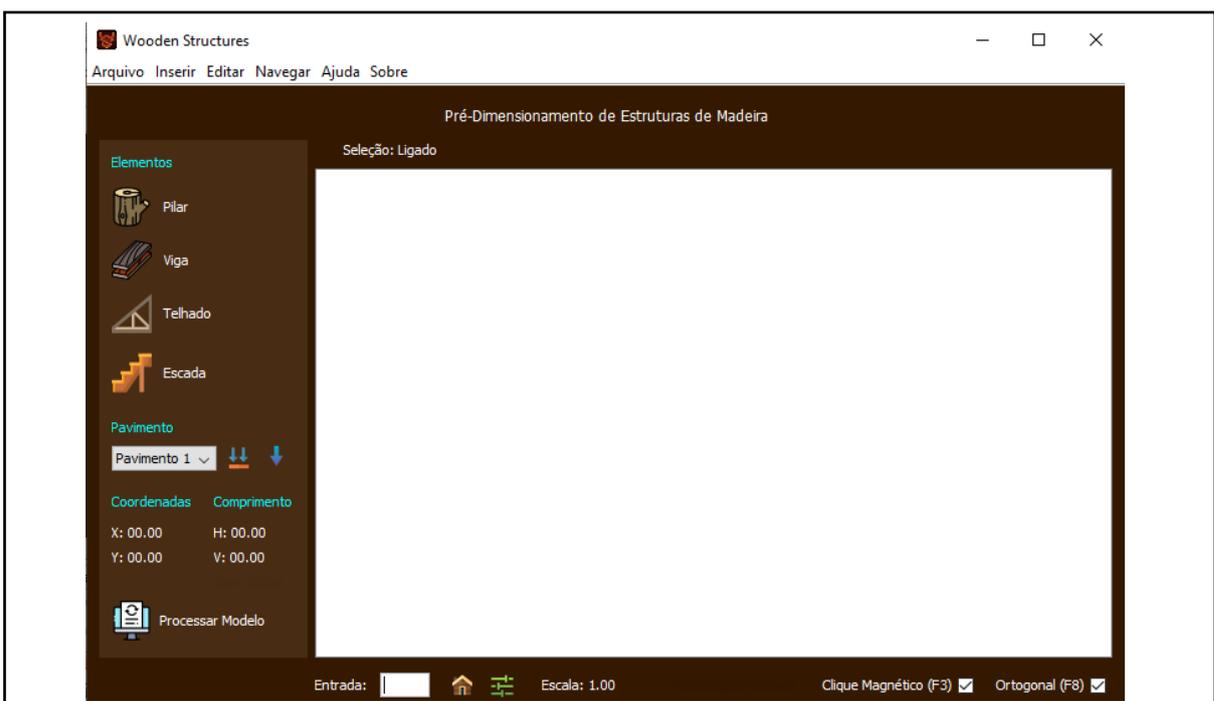
Figura 4.2 - Configuração dos pavimentos - Wooden Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após configurar os pavimentos, o usuário será direcionado a tela principal do *software* (Figura 4.3), e poderá optar por qualquer uma das funções previstas anteriormente no diagrama das funcionalidades.

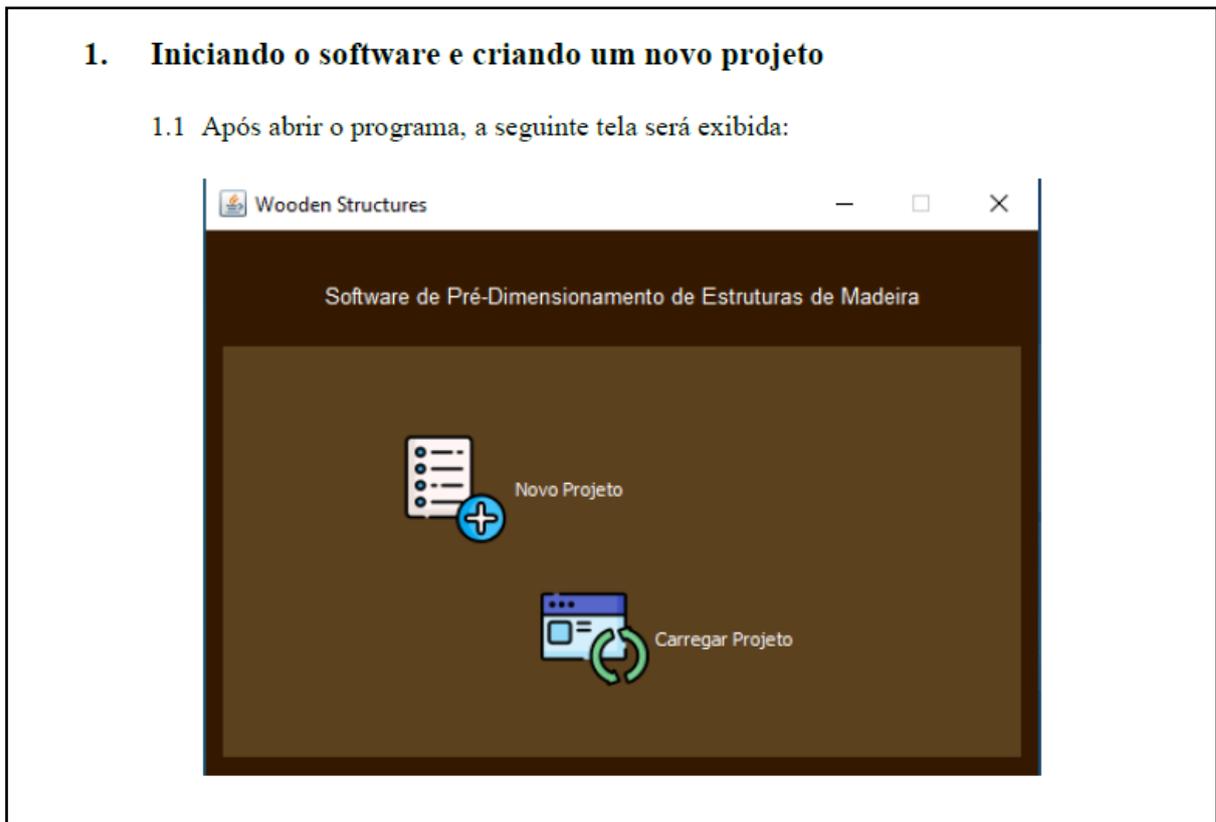
Figura 4.3 - Tela Principal - Wooden Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O sistema é bem intuitivo, organizado, e deixa claro os insumos e informações necessárias que servem de requisito para realizar determinada tarefa. Apesar disso, com a ideia de facilitar ainda mais o seu uso, foi elaborado um manual de uso do sistema. O usuário poderá encontrá-lo no diretório de instalação do *software*, ou pelo menu interno “Ajuda”. Na Figura 4.4 é apresentada a página inicial do PDF “Manual de utilização”:

Figura 4.4 - Página inicial “Manual de utilização – Wooden Structures



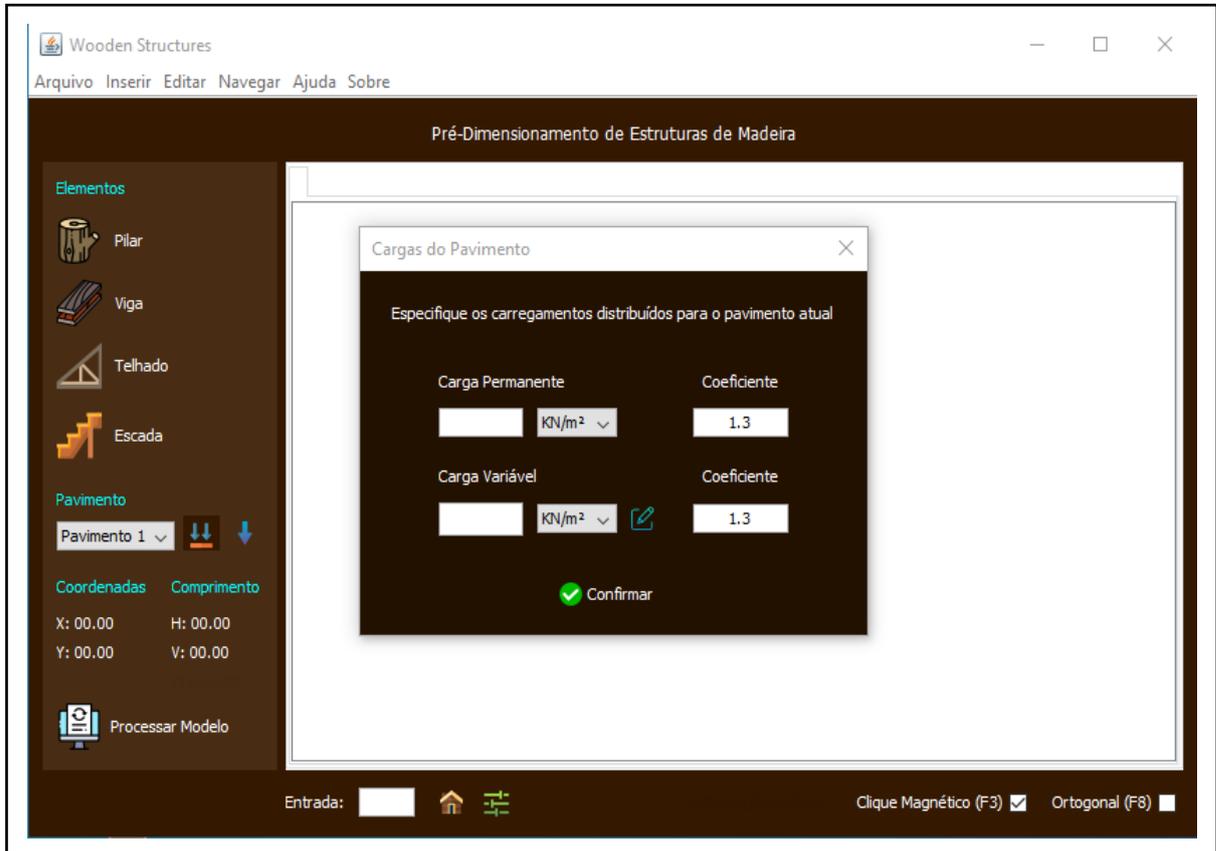
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após desenhar a estrutura, com vigas e pilares, e seguindo uma sequência lógica de lançamento de uma estrutura, o passo seguinte é informar as cargas nos elementos. Essas cargas podem ser inseridas de diversas formas: carga por pavimento (permanente e variável), por área de influência no próprio elemento (viga ou pilar) ou a carga solicitante diretamente no elemento estrutural.

A primeira opção citada, carga por pavimento, é descrita nas Figuras 4.5 e 4.6. Na primeira Figura, é possível observar como esse requisito é passado do sistema para o usuário.

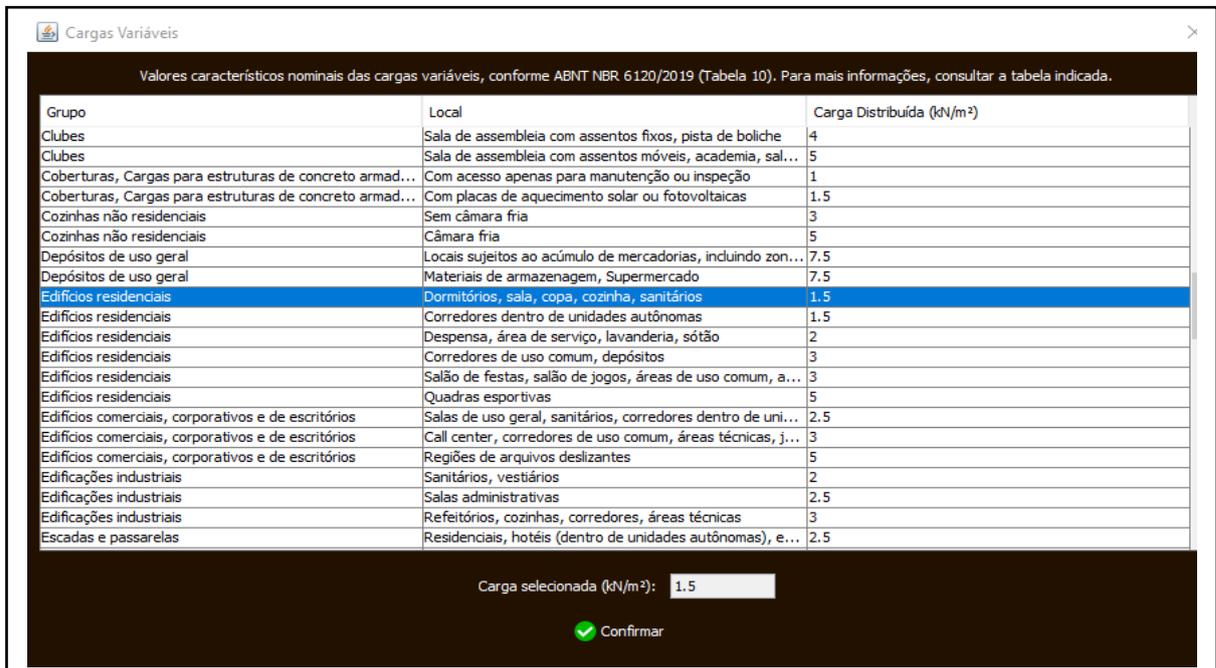
Já na segunda, são exibidas as informações pré-definidas de cargas variáveis para pavimentos, conforme descreve a ABNT NBR 6120/2019.

Figura 4.5 - Cargas do pavimento - Wooden Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

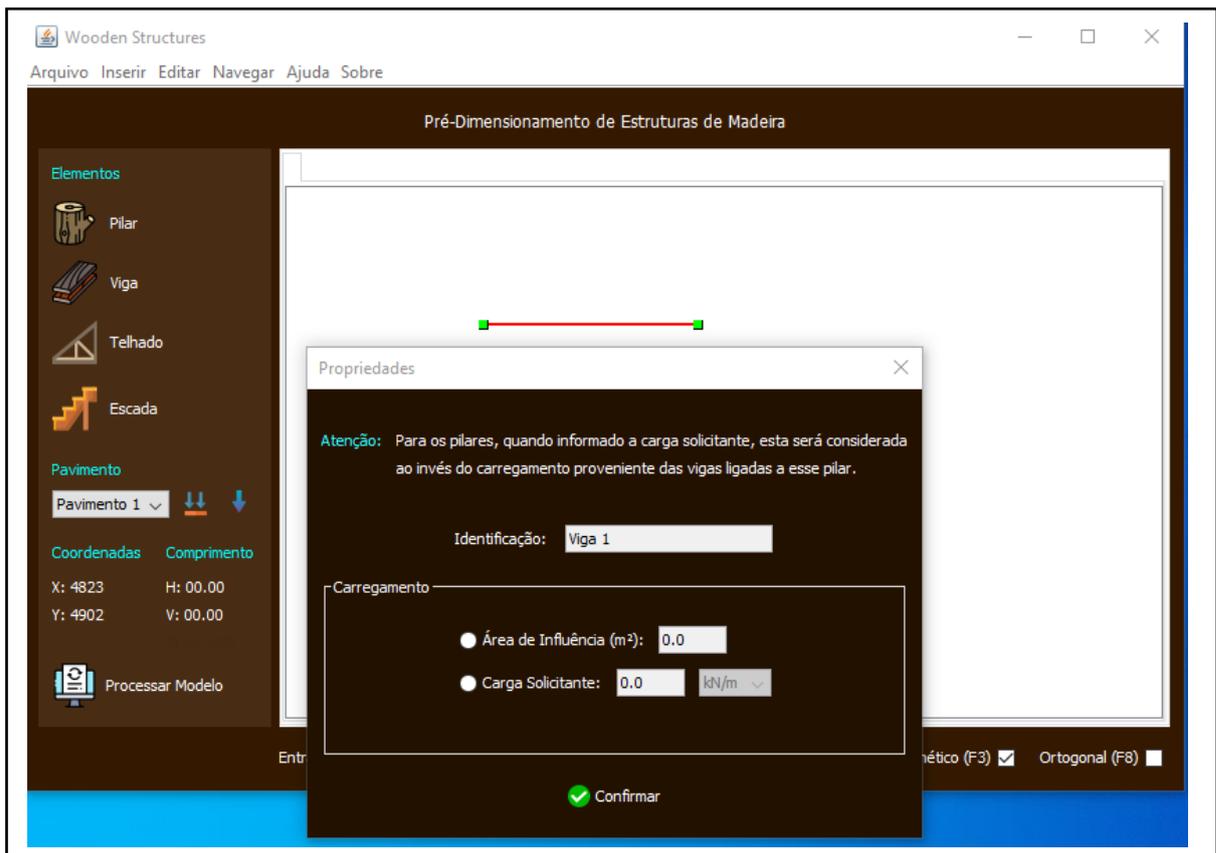
Figura 4.6 - Cargas Variáveis - Wooden Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As cargas inseridas diretamente sobre os elementos, seja por área de influência ou por carga distribuída linearmente, é apresentada na Figura 4.7:

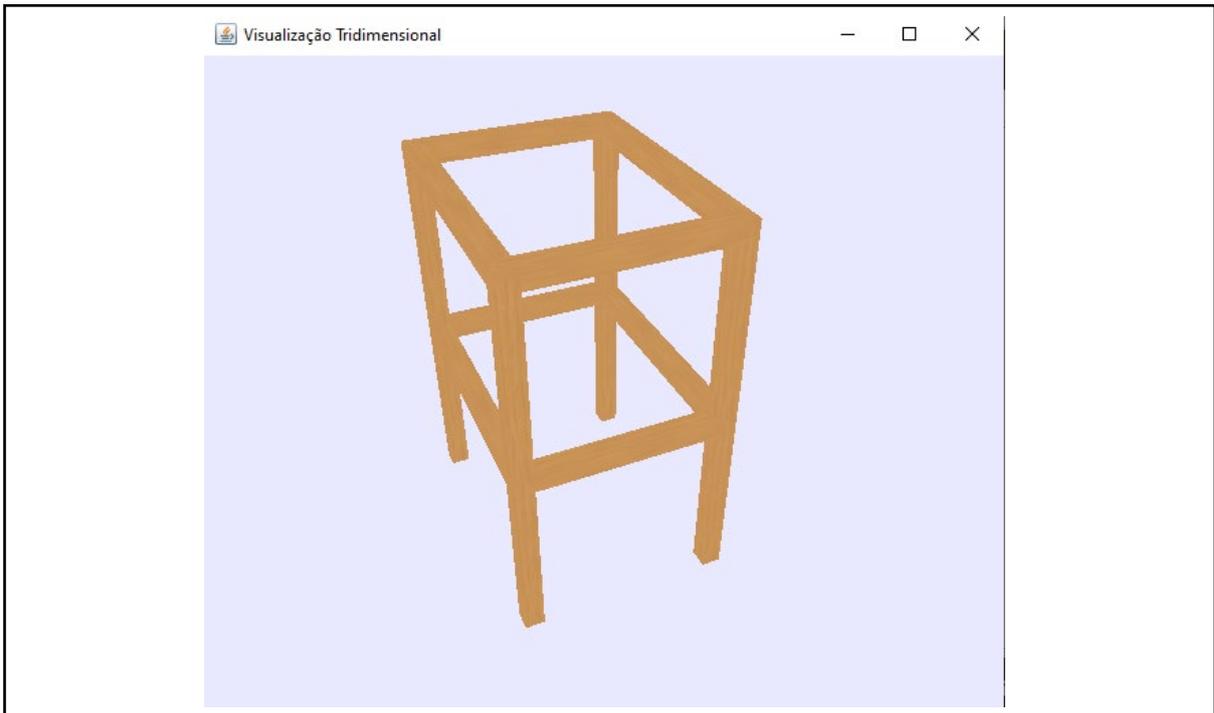
Figura 4.7 - Carga sobre o elemento - Wooden Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Conforme já citado, a visualização tridimensional da estrutura é uma função com grande relevância para o usuário final. Com essa opção disponível, é possível que o usuário tenha noções e perspectivas volumétricas que não são possíveis em um desenho de duas dimensões. Diante disso, o sistema foi codificado, para que de forma simples realize conversões gráficas e apresente um modelo tridimensional composto por elementos representativos. A Figura 4.8 apresenta um modelo 3D de uma estrutura lançada no *software*:

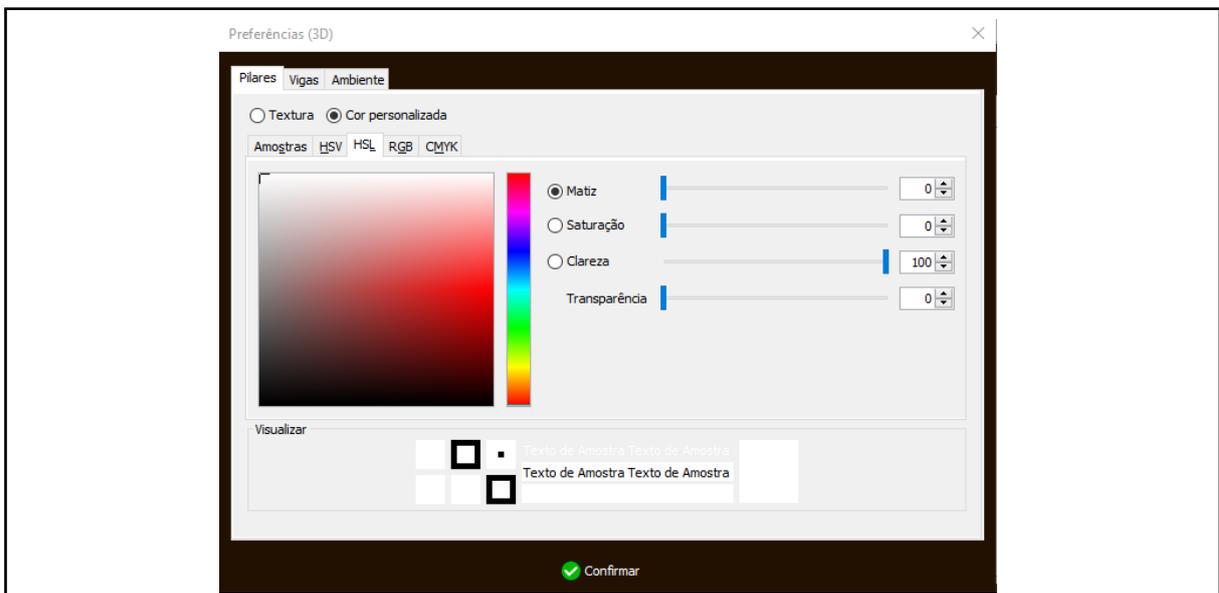
Figura 4.8 - Modelo Tridimensional - Wooden Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Diversas opções adicionais estão presentes no *software*, principalmente, aspectos de personalização. É possível realizar ações gráficas tanto no desenho bidimensional quanto no tridimensional. Essas ações são: escalas (*zoom*), deslocamentos (*pan*) e rotações nas três dimensões. Ainda, para o modelo tridimensional, foi inserido no sistema, ferramentas de personalização visual dos elementos (Figura 4.9).

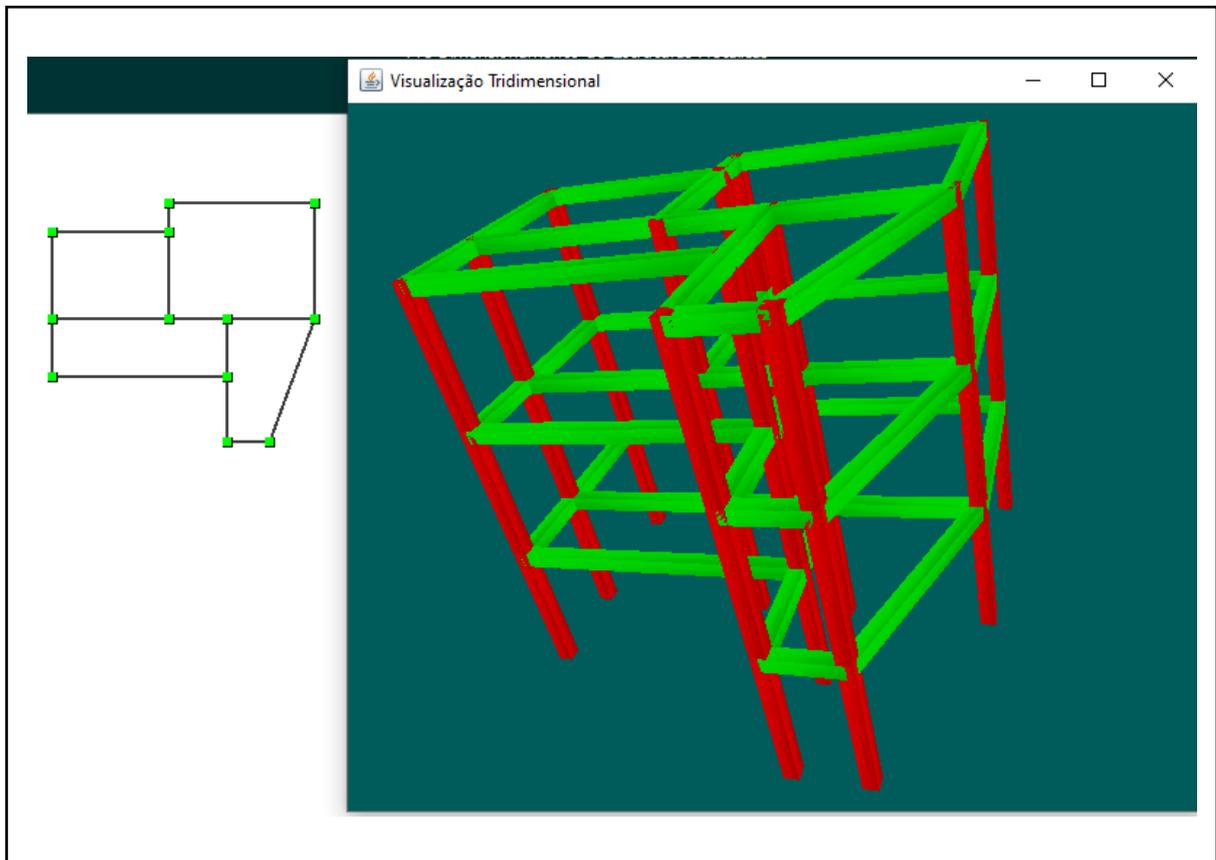
Figura 4.9 - Preferências 3D - Wooden Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 4.10 é apresentado um modelo tridimensional com as ações gráficas citadas, e seu respectivo modelo bidimensional:

Figura 4.10 - Modelo Tridimensional - Wooden Structures



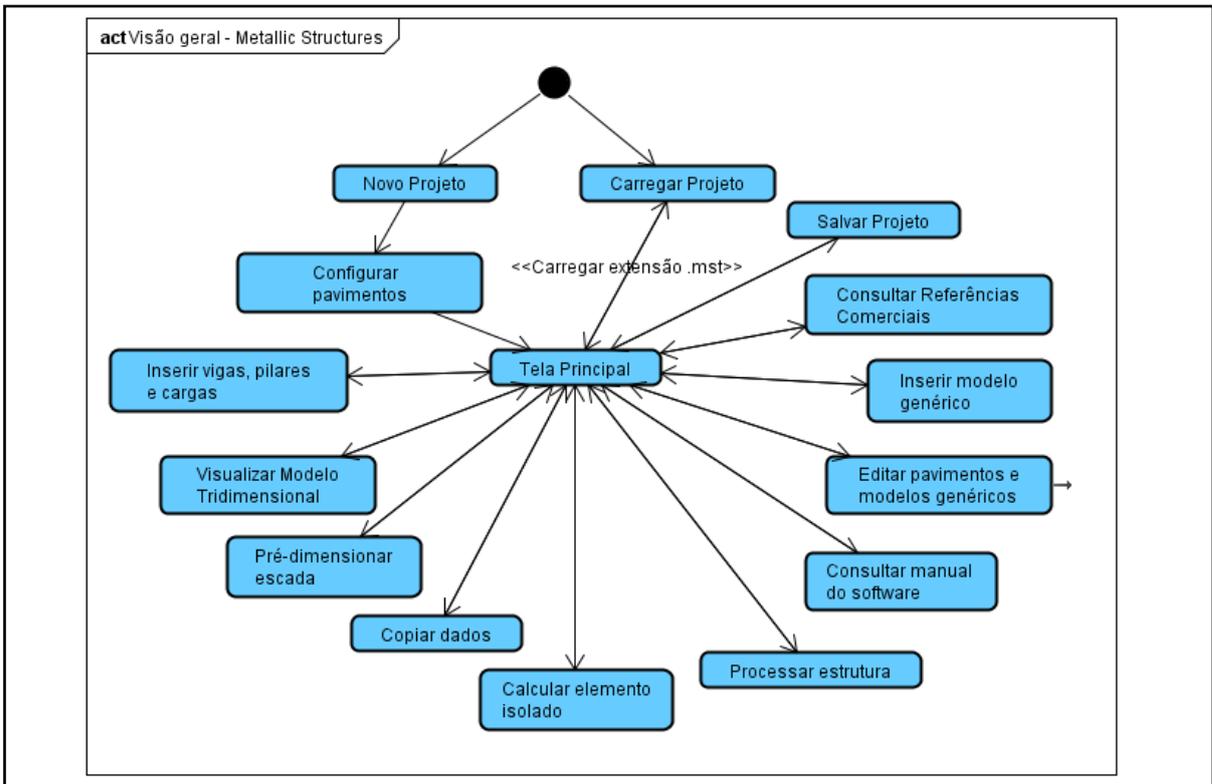
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.2. Metallic Structures

O *software* Metallic Structures é bastante similar ao sistema de pré-dimensionamento de estruturas de madeira Wooden Structures. A necessidade de criar dois *softwares* ao invés de um, em suma, é por questões práticas de aplicação de normas técnicas e cálculos específicos, e também por aspectos estéticos, que permitem uma imersão maior entre usuário-sistema.

O fluxograma de utilização do sistema, pode ser conferido por meio de um diagrama das funcionalidades, presente na Figura 4.11:

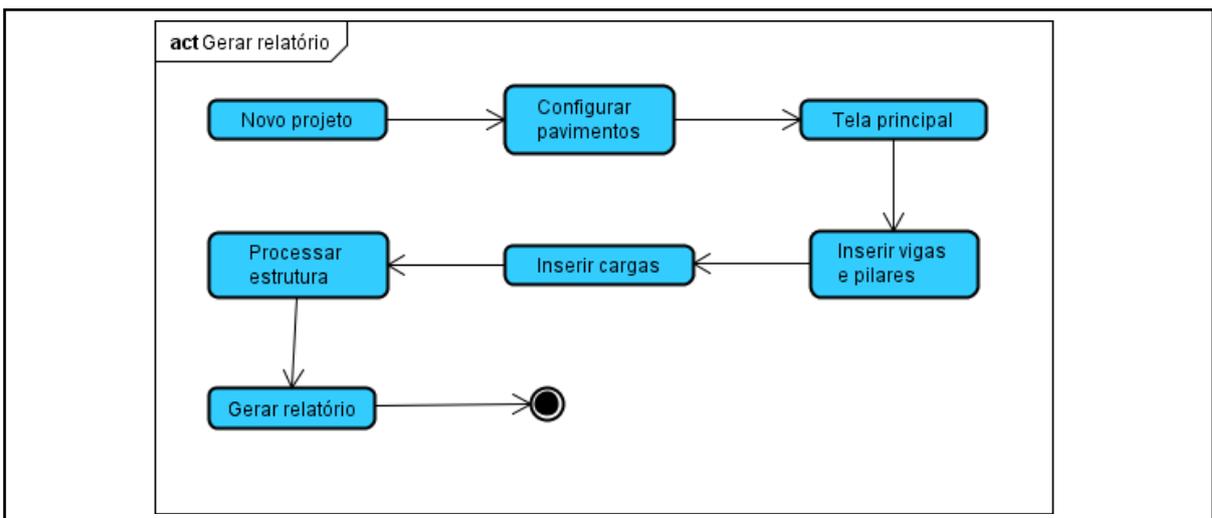
Figura 4.11 - Diagrama das funcionalidades - Metallic Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na figura 4.12 é apresentada a sequência lógica usada para gerar um relatório, no software:

Figura 4.12 - Gerar relatório

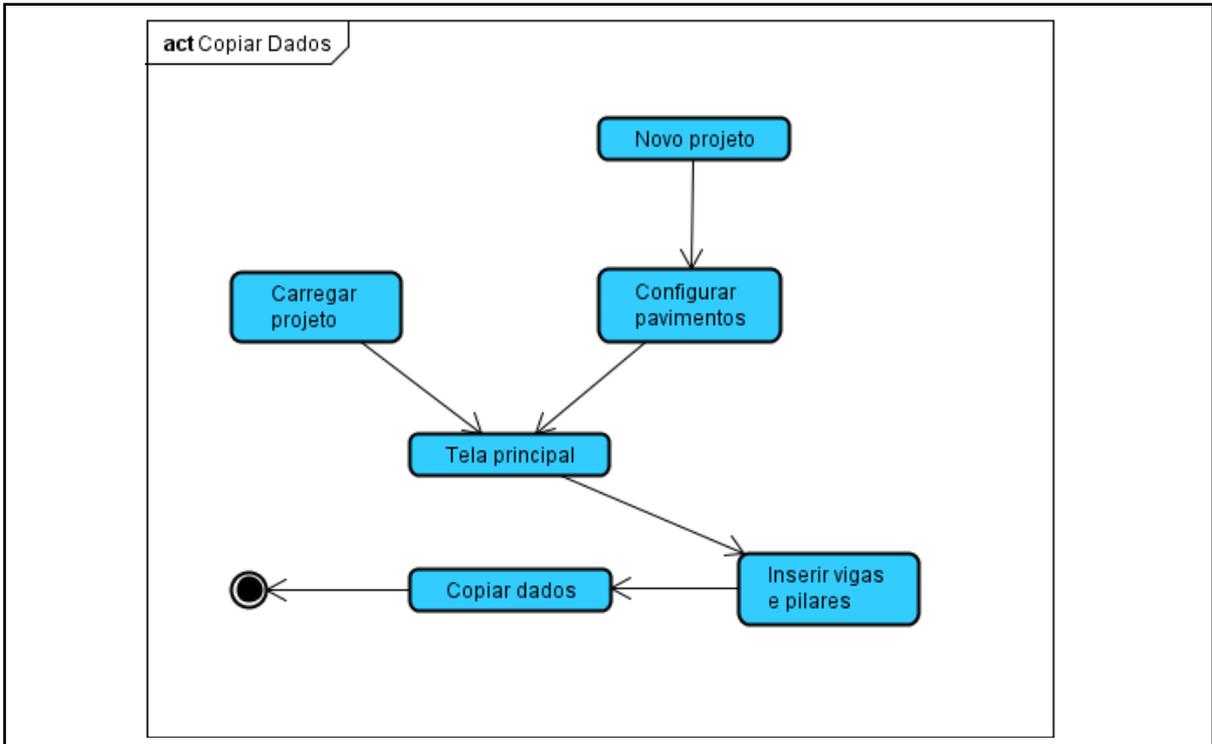


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17, demonstram sequências lógicas, por meio de diagramas, de diversas atividades que estão presentes em ambos os *softwares*. Serão

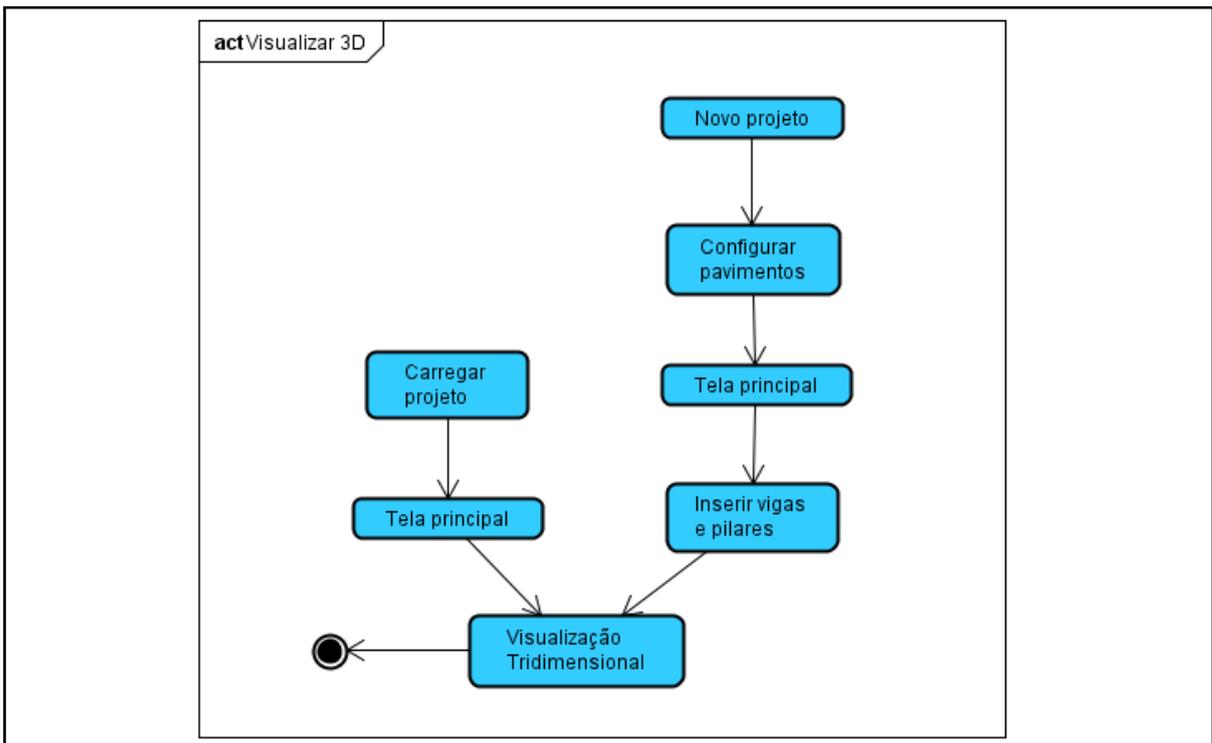
apresentados os diagramas de “Copiar dados”, “Visualização tridimensional”, “Cálculo de elemento isolado”, “Edição de pavimentos e modelos genéricos” e “Referências comerciais e Manual do software”, respectivamente.

Figura 4.13 - Copiar dados



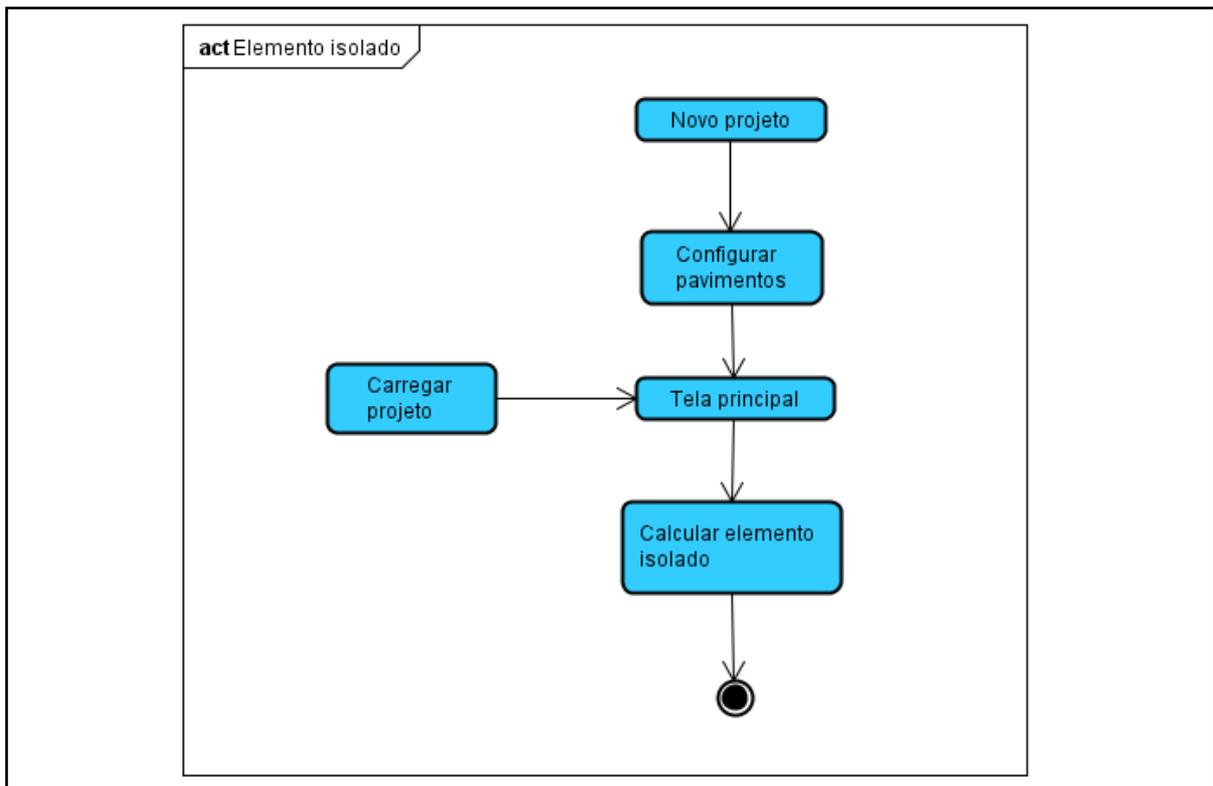
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 4.14 - Visualização tridimensional



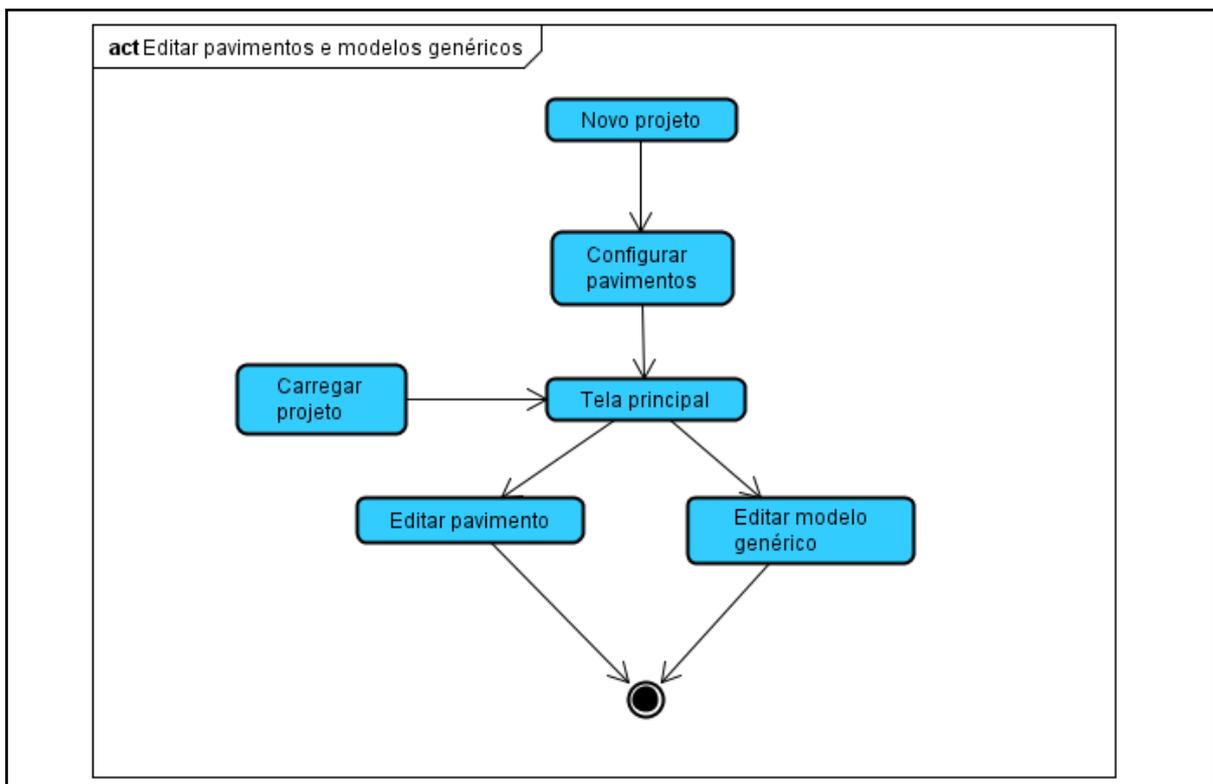
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 4.15 - Cálculo de elemento isolado



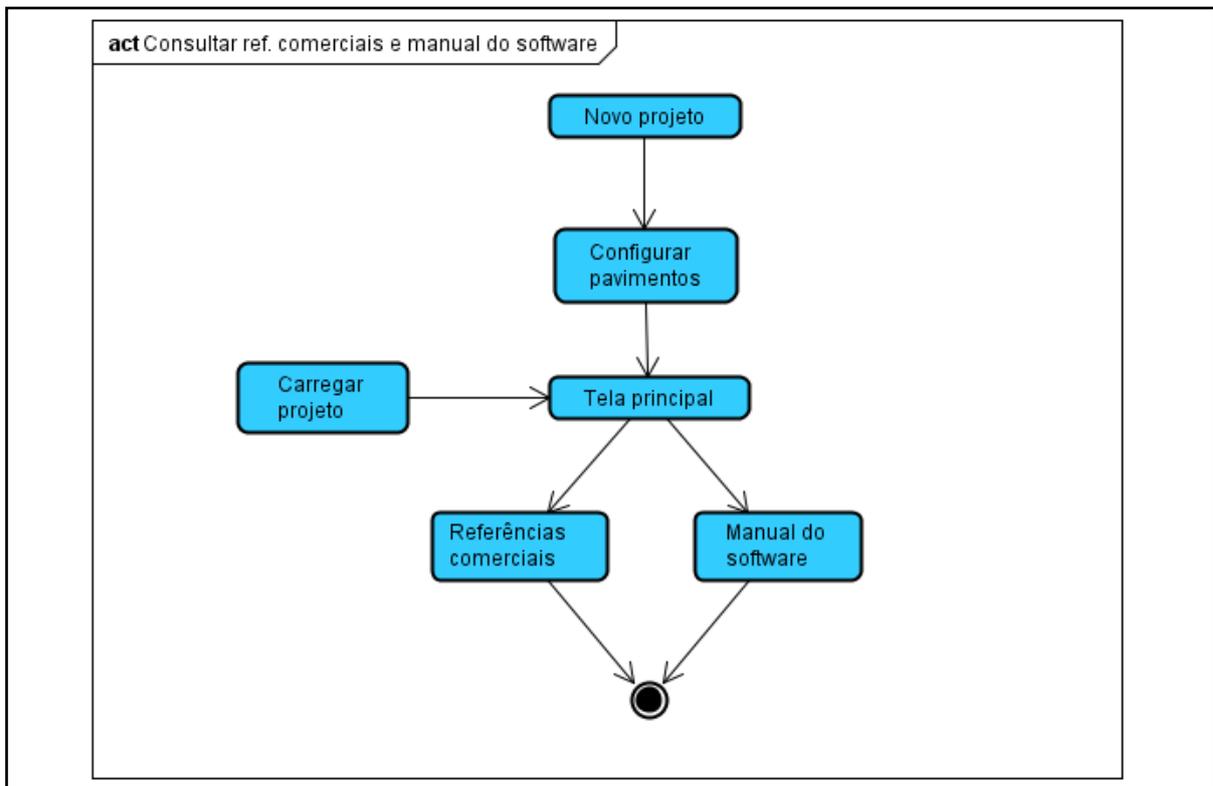
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 4.16 - Edição de pavimentos e modelos genéricos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

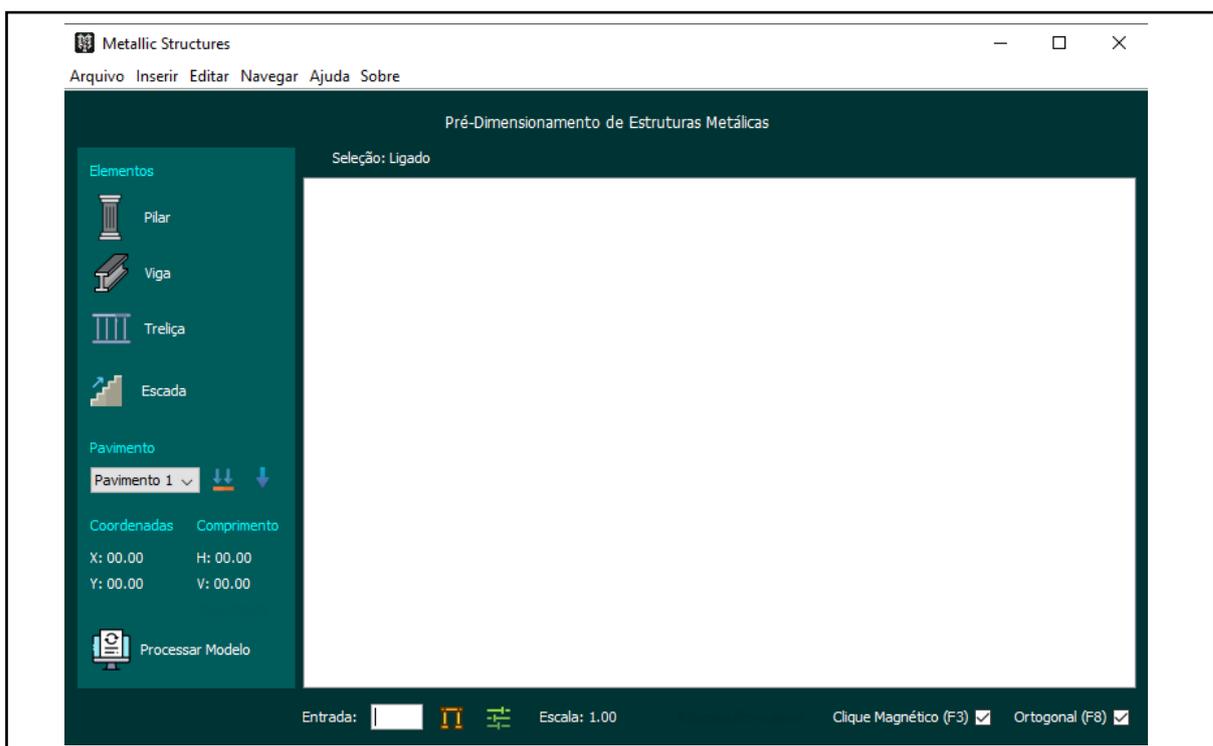
Figura 4.17 - Referências comerciais e Manual do software



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 4.18 apresenta a tela principal do *software*:

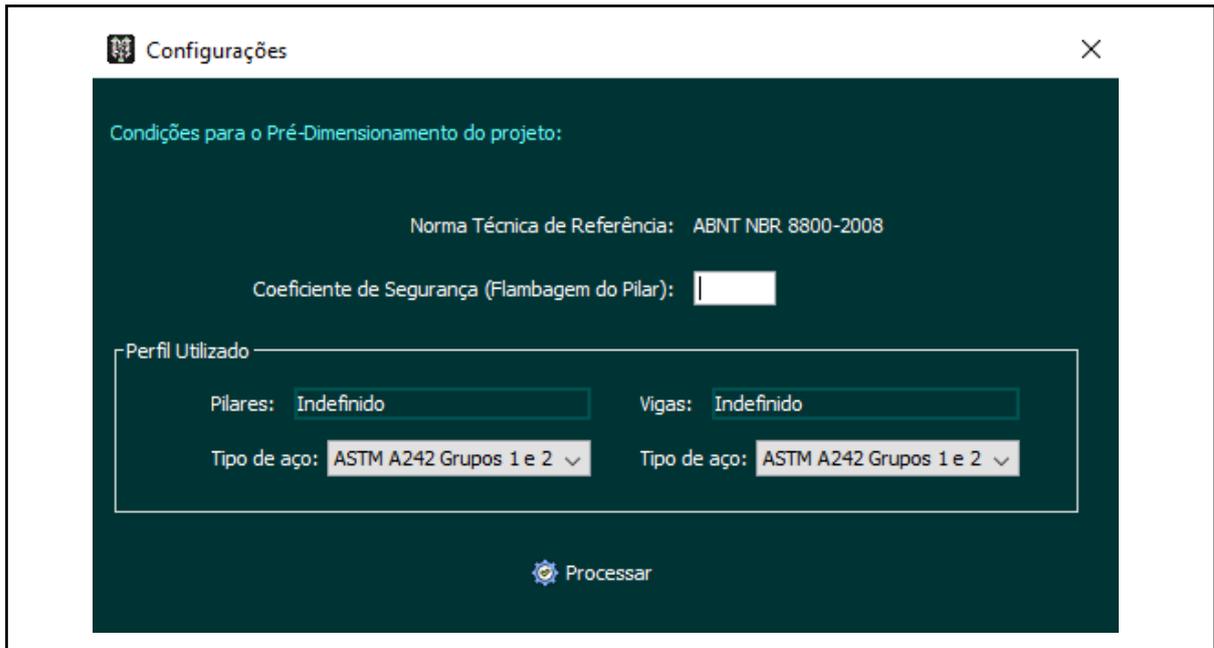
Figura 4.18 - Tela principal - Metallic Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em ambos os *softwares* é possível definir as configurações de perfis ou espécies e coeficientes antes de pré-dimensionar a estrutura. A figura 4.19 apresenta essa tela de configuração, que é exibida no processamento final, para gerar o relatório.

Figura 4.19 - Processando o modelo - Metallic Structures



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O relatório final de uma estrutura simples, com dois pavimentos gerado pelo *software* Wooden Structures é apresentado no Anexo A. Os dois sistemas geram esse relatório de forma similar, com seus respectivos respaldos técnicos, citados no capítulo 2.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho é apresentar o estudo e desenvolvimento dos *softwares* Metallic Structures e Wooden Structures. Os sistemas têm como finalidade pré-dimensionar estruturas de aço e madeira, e associar a seção mínima calculada com uma seção comercial. Para conseguir cumprir tal objetivo, foram demonstradas diversas técnicas utilizadas ao longo do desenvolvimento dos *softwares*.

A primeira parte do trabalho, foi o estudo e revisão bibliográfica a respeito das normas técnicas de dimensionamento da madeira e do aço, como elemento estrutural. Nessa fase, todo o referencial teórico multidisciplinar abordado, serviu de pré-requisito e orientação, principalmente, para formulação e roteiro dos cálculos realizados pelos *softwares*.

A segunda etapa consistiu no estudo e análise das possíveis abordagens técnicas para desenvolver os sistemas. Além das técnicas de programação usadas, também foi evidenciado os aspectos que levaram a escolha das referências comerciais adotadas.

No capítulo “Resultados e Análises”, foram apresentados por meio de telas capturadas do sistema, como esse se comporta durante e após a alimentação de insumos. Também é apresentado como apêndice do trabalho, um relatório gerado por um dos *softwares*, simulando um modelo real de estrutura.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, diversos problemas foram encontrados, de forma prevista, devido à complexidade de programação usada para dar funcionalidade aos *softwares*. Desses problemas, podem ser citados: lógicas complexas de cálculo, para permitir associar frações de números calculados com seções comerciais e problemas gráficos de matrizes tridimensionais usadas para representar os elementos estruturais no espaço.

Os problemas descritos acabaram consumindo prazo considerável, no desenvolvimento do trabalho. No entanto, tais contratempos foram solucionados com lógicas complexas, atreladas ao uso de inúmeros vetores, matrizes, *thread* e laços de repetição, que fazem uso substancial e racional do desempenho do computador.

Diante das informações dissertadas, fica evidenciado o cumprimento dos objetivos propostos, e também, que a hipótese inicial levantada para alcançar tais objetivos, estava correta, além de servir como base para solucionar a problemática apresentada. Vale ressaltar, que o objetivo principal do trabalho não é ostentar uma didática de programação, mas demonstrar uma relação de ganhos, proveniente da associação da engenharia com a programação.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 237 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sobre a normalização**. 2022. Disponível: < <https://www.abnt.org.br/normalizacao/sobre>>. Acesso em: 12 set. 2022.
- BRANCHIER, Henrique. **Contribuições dos softwares na aprendizagem de análise e cálculo de elementos estruturais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.
- DEITEL, Paul; DEITEL, Harvey. **Java: como programar**. 10. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2017.
- DURANTE, Fábio. **O uso da metodologia BIM (Building Information Modeling) para gerenciamento de projetos**: Gerente BIM. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.
- EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- ENGEL, Heino. **Sistemas de Estructuras**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A., 2001.
- FLEURY, Maria; WERLANG, Sergio. Pesquisas aplicadas: conceitos e abordagens. **Gvpesquisa**, São Paulo, p. 10-15, 2016/2017.
- HIBBELER, Russel. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- ITEXT. **Our history**. 2023. Disponível: <<https://itextpdf.com/itext-history-page>>. Acesso em: 05 jun. 2023.
- JOGL. **Java Binding For The OpenGL API**. 2010. Disponível: <<https://jogamp.org/jogl/www/>>. Acesso em: 06 jun. 2023.
- KIMURA, Alio. **Informática aplicada a estruturas de concreto armado**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.
- LINGALA, Srikanth. **Zip4j - Uma biblioteca Java para arquivos zip / streams**. 2019. Disponível: < <https://github.com/srikanth-lingala/zip4j>>. Acesso em: 09 jun. 2023.
- MARTHA, Luiz. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MELO, Paula. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira, de aço e de concreto para auxílio à concepção de projetos arquitetônicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

MIRANDA, Walzenira; SILVA, Antonio. O papel do engenheiro no uso de softwares para cálculo estrutural. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 1, p. 3681-3698, jan. 2022.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PINHEIRO, Antonio. **Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

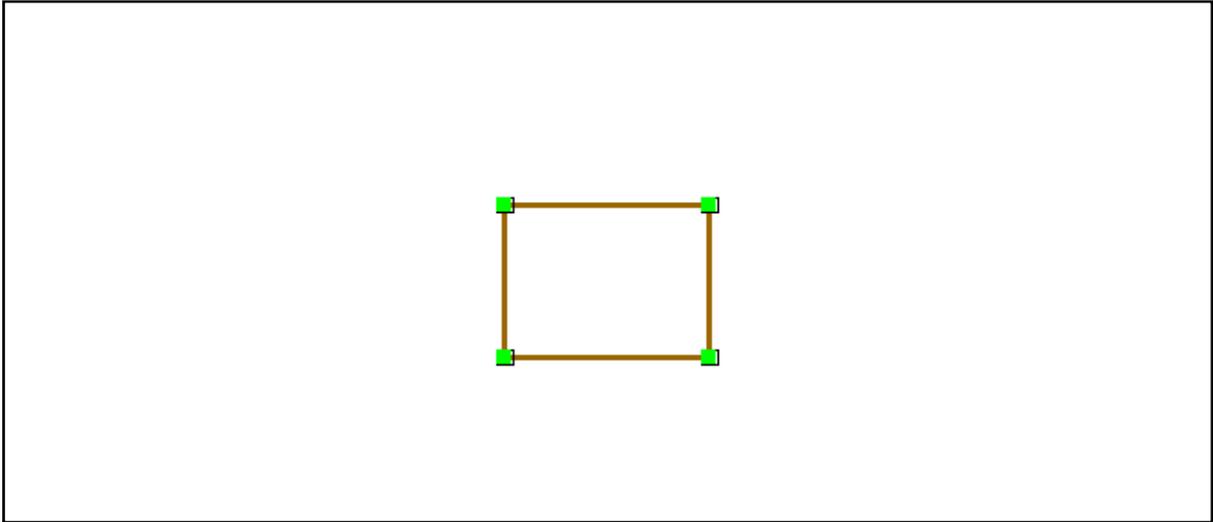
SANTOS, Altair. **Softwares transformam a engenharia estrutural**. 2009. Disponível: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/softwares-transformam-a-engenharia-estrutural/>>. Acesso em: 15 set. 2022.

SILVA, Juliano; PRAVIA, Zacarias. JWood: Um Objeto Educacional para Aprendizado de Elementos de Estruturas de Madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 39, n. 2, p. 133-142, jul./dez. 2018.

APÊNDICE A - RELATÓRIO FINAL DO SISTEMA WOODEN STRUCTURES

Nas Figuras A.1 e A.2, é possível visualizar a estrutura lançada no sistema. Em seguida, é apresentado o relatório gerado pelo *software* para esta estrutura.

Figura A.1 - Estrutura lançada (Wooden Structures)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura A.2 - Visualização tridimensional (Wooden Structures)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Projeto de Madeira
Memorial de Cálculo - Seção Mínima

Dados Iniciais (Vigas)

Espécie: Garapeira

$F_{c0,k} = 60.0$ MPa

$F_{t0,k} = 60.0$ MPa

$F_{v,k} = 8.0$ MPa

$E_{c0,med} = 19500.0$ MPa

Cálculo

$K_{mod} = 0.63$

$E_{cef} = E_{c0,med} * K_{mod}$

$E_{cef} = 12285.00$ MPa

Viga 1 (Pavimento 1)

Carga Solicitante = 0.50 KN/m

Vão Teórico (L) = 4.0 m

Inércia da Seção = $((Base/100) * ((Altura/100)^3)) / 12$

Inércia da Seção = $1.4062499999999998E-5$ m⁴

Inércia Necessária = $((Carga\ Solicitante/1000) * 1800 * V\tilde{a}o\ Te\acute{o}rico^3) / (384 * E_{cef})$

Inércia Necessária = $1.221001221001221E-5$ m⁴

Seção Mínima da Viga = 5x15cm

Tensão Atuante (Tat) = $(Carga\ Solicitante / 1000) / ((Base / 100) * (Altura / 100))$

Tat = 0.07 MPa

$F_{vd} = (k_{mod} * F_{v,k}) / 1.8$

$F_{vd} = 2.80$ MPa

$F_{cd} = (k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$

$F_{cd} = 27.00$ MPa

$F_{td} = (k_{mod} * F_{t0,k}) / 1.4$

$F_{td} = 27.00$ MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência de Projeto do Material (Fvd)

Seção Mínima da Viga = 5x15cm

Viga 2 (Pavimento 1)

Carga Solicitante = 0.50 KN/m

Vão Teórico (L) = 3.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100) * ((\text{Altura}/100)^3)) / 12$

Inércia da Seção = 5.545833333333334E-6 m⁴

Inércia Necessária = $((\text{Carga Solicitante}/1000) * 1800 * \text{Vão Teórico}^3) / (384 * E_{cef})$

Inércia Necessária = 5.151098901098902E-6 m⁴

Seção Mínima da Viga = 5x11cm

Tensão Atuante (Tat) = $(\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base} / 100) * (\text{Altura} / 100))$

Tat = 0.09 MPa

Fvd = $(k_{mod} * F_{v,k}) / 1.8$

Fvd = 2.80 MPa

Fcd = $(k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$

Fcd = 27.00 MPa

Ftd = $(k_{mod} * F_{t0,k}) / 1.4$

Ftd = 27.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência de Projeto do Material (Fvd)

Seção Mínima da Viga = 5x11cm

Viga 3 (Pavimento 1)

Carga Solicitante = 0.50 KN/m

Vão Teórico (L) = 4.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100) * ((\text{Altura}/100)^3)) / 12$

Inércia da Seção = 1.4062499999999998E-5 m⁴

Inércia Necessária = $((\text{Carga Solicitante}/1000) * 1800 * \text{Vão Teórico}^3) / (384 * E_{cef})$

Inércia Necessária = 1.221001221001221E-5 m⁴

Seção Mínima da Viga = 5x15cm

Tensão Atuante (Tat) = $(\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base} / 100) * (\text{Altura} / 100))$

Tat = 0.07 MPa

Fvd = $(k_{mod} * F_{v,k}) / 1.8$

Fvd = 2.80 MPa

Fcd = $(k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$

Fcd = 27.00 MPa

Ftd = $(k_{mod} * F_{t0,k}) / 1.4$

Ftd = 27.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência de Projeto do Material (Fvd)

Seção Mínima da Viga = 5x15cm

Viga 4 (Pavimento 1)

$$\text{Carga Solicitante} = 0.50 \text{ KN/m}$$

$$\text{V\~{a}o Te\~{o}rico (L)} = 3.0 \text{ m}$$

$$\text{In\~{e}rcia da Se\~{c}\~{a}o} = ((\text{Base}/100) * ((\text{Altura}/100)^3)) / 12$$

$$\text{In\~{e}rcia da Se\~{c}\~{a}o} = 5.545833333333334\text{E-}6 \text{ m}^4$$

$$\text{In\~{e}rcia Necess\~{a}ria} = ((\text{Carga Solicitante}/1000) * 1800 * \text{V\~{a}o Te\~{o}rico}^3) / (384 * E_{cef})$$

$$\text{In\~{e}rcia Necess\~{a}ria} = 5.151098901098902\text{E-}6 \text{ m}^4$$

$$\text{Se\~{c}\~{a}o M\~{i}nima da Viga} = 5 \times 11 \text{ cm}$$

$$\text{Tens\~{a}o Atuante (Tat)} = (\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base} / 100) * (\text{Altura} / 100))$$

$$\text{Tat} = 0.09 \text{ MPa}$$

$$\text{Fvd} = (\text{kmod} * \text{Fv,k}) / 1.8$$

$$\text{Fvd} = 2.80 \text{ MPa}$$

$$\text{Fcd} = (\text{kmod} * \text{Fc0,k}) / 1.4$$

$$\text{Fcd} = 27.00 \text{ MPa}$$

$$\text{Ftd} = (\text{kmod} * \text{Ft0,k}) / 1.4$$

$$\text{Ftd} = 27.00 \text{ MPa}$$

Como a Tens\~{a}o Atuante (Tat) \u2264 Resist\~{e}ncia de Projeto do Material (Fvd)

$$\text{Se\~{c}\~{a}o M\~{i}nima da Viga} = 5 \times 11 \text{ cm}$$

Viga 1 (Pavimento 2)

$$\text{Carga Solicitante} = 0.50 \text{ KN/m}$$

$$\text{V\~{a}o Te\~{o}rico (L)} = 4.0 \text{ m}$$

$$\text{In\~{e}rcia da Se\~{c}\~{a}o} = ((\text{Base}/100) * ((\text{Altura}/100)^3)) / 12$$

$$\text{In\~{e}rcia da Se\~{c}\~{a}o} = 1.4062499999999998\text{E-}5 \text{ m}^4$$

$$\text{In\~{e}rcia Necess\~{a}ria} = ((\text{Carga Solicitante}/1000) * 1800 * \text{V\~{a}o Te\~{o}rico}^3) / (384 * E_{cef})$$

$$\text{In\~{e}rcia Necess\~{a}ria} = 1.221001221001221\text{E-}5 \text{ m}^4$$

$$\text{Se\~{c}\~{a}o M\~{i}nima da Viga} = 5 \times 15 \text{ cm}$$

$$\text{Tens\~{a}o Atuante (Tat)} = (\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base} / 100) * (\text{Altura} / 100))$$

$$\text{Tat} = 0.07 \text{ MPa}$$

$$\text{Fvd} = (\text{kmod} * \text{Fv,k}) / 1.8$$

$$\text{Fvd} = 2.80 \text{ MPa}$$

$$\text{Fcd} = (\text{kmod} * \text{Fc0,k}) / 1.4$$

$$\text{Fcd} = 27.00 \text{ MPa}$$

$$\text{Ftd} = (\text{kmod} * \text{Ft0,k}) / 1.4$$

$$\text{Ftd} = 27.00 \text{ MPa}$$

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência de Projeto do Material (Fvd)
Seção Mínima da Viga = 5x15cm

Viga 2 (Pavimento 2)

Carga Solicitante = 0.50 KN/m

Vão Teórico (L) = 3.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100) * ((\text{Altura}/100)^3)) / 12$

Inércia da Seção = 5.545833333333334E-6 m⁴

Inércia Necessária = $((\text{Carga Solicitante}/1000) * 1800 * \text{Vão Teórico}^3) / (384 * E_{cef})$

Inércia Necessária = 5.151098901098902E-6 m⁴

Seção Mínima da Viga = 5x11cm

Tensão Atuante (Tat) = $(\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base} / 100) * (\text{Altura} / 100))$

Tat = 0.09 MPa

Fvd = $(k_{mod} * F_{v,k}) / 1.8$

Fvd = 2.80 MPa

Fcd = $(k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$

Fcd = 27.00 MPa

Ftd = $(k_{mod} * F_{t0,k}) / 1.4$

Ftd = 27.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência de Projeto do Material (Fvd)
Seção Mínima da Viga = 5x11cm

Viga 3 (Pavimento 2)

Carga Solicitante = 0.50 KN/m

Vão Teórico (L) = 4.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100) * ((\text{Altura}/100)^3)) / 12$

Inércia da Seção = 1.406249999999998E-5 m⁴

Inércia Necessária = $((\text{Carga Solicitante}/1000) * 1800 * \text{Vão Teórico}^3) / (384 * E_{cef})$

Inércia Necessária = 1.221001221001221E-5 m⁴

Seção Mínima da Viga = 5x15cm

Tensão Atuante (Tat) = $(\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base} / 100) * (\text{Altura} / 100))$

Tat = 0.07 MPa

Fvd = $(k_{mod} * F_{v,k}) / 1.8$

Fvd = 2.80 MPa

Fcd = $(k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$

Fcd = 27.00 MPa

$$F_{td} = (k_{mod} * F_{t0,k}) / 1.4$$

$$F_{td} = 27.00 \text{ MPa}$$

Como a Tensão Atuante (T_{at}) é \leq Resistência de Projeto do Material (F_{vd})

Seção Mínima da Viga = 5x15cm

Viga 4 (Pavimento 2)

$$\text{Carga Solicitante} = 0.50 \text{ KN/m}$$

$$\text{Vão Teórico (L)} = 3.0 \text{ m}$$

$$\text{Inércia da Seção} = ((\text{Base}/100) * ((\text{Altura}/100)^3)) / 12$$

$$\text{Inércia da Seção} = 5.545833333333334E-6 \text{ m}^4$$

$$\text{Inércia Necessária} = ((\text{Carga Solicitante}/1000) * 1800 * \text{Vão Teórico}^3) / (384 * E_{cef})$$

$$\text{Inércia Necessária} = 5.151098901098902E-6 \text{ m}^4$$

Seção Mínima da Viga = 5x11cm

$$\text{Tensão Atuante (Tat)} = (\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base} / 100) * (\text{Altura} / 100))$$

$$T_{at} = 0.09 \text{ MPa}$$

$$F_{vd} = (k_{mod} * F_{v,k}) / 1.8$$

$$F_{vd} = 2.80 \text{ MPa}$$

$$F_{cd} = (k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$$

$$F_{cd} = 27.00 \text{ MPa}$$

$$F_{td} = (k_{mod} * F_{t0,k}) / 1.4$$

$$F_{td} = 27.00 \text{ MPa}$$

Como a Tensão Atuante (T_{at}) é \leq Resistência de Projeto do Material (F_{vd})

Seção Mínima da Viga = 5x11cm

Dados Iniciais (Pilares)

Espécie: Cambará

$$F_{c0,k} = 20.0 \text{ MPa}$$

$$\text{Coeficiente de Segurança (fs)} = 2.0$$

$$E_{c0,med} = 10000.0 \text{ MPa}$$

Cálculo

$$K_{mod} = 0.63$$

$$E_{cef} = E_{c0,med} * K_{mod}$$

$$E_{cef} = 6300.00 \text{ MPa}$$

Pilar 1 (Pavimento 1)

Carga Solicitante = 3.50 KN

Comprimento de Flambagem (Lf) = 3.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100)^4) / 12$

Inércia da Seção = 8.333333333333335E-6 m⁴

Inércia Necessária = $((\text{Carga Solicitante} / 1000) * f_s * L_f * L_f) / (\text{PI} * \text{PI} * E_{cef})$

Inércia Necessária = 1.0132118364233778E-6 m⁴

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Tensão Atuante (Tat) = $(\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base}/100)^2)$

Tat = 0.35 MPa

Fcd = $(k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$

Fcd = 9.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência à Compressão de Projeto do Material (Fcd):

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Pilar 2 (Pavimento 1)

Carga Solicitante = 3.50 KN

Comprimento de Flambagem (Lf) = 3.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100)^4) / 12$

Inércia da Seção = 8.333333333333335E-6 m⁴

Inércia Necessária = $((\text{Carga Solicitante} / 1000) * f_s * L_f * L_f) / (\text{PI} * \text{PI} * E_{cef})$

Inércia Necessária = 1.0132118364233778E-6 m⁴

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Tensão Atuante (Tat) = $(\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base}/100)^2)$

Tat = 0.35 MPa

Fcd = $(k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$

Fcd = 9.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência à Compressão de Projeto do Material (Fcd):

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Pilar 3 (Pavimento 1)

Carga Solicitante = 3.50 KN

Comprimento de Flambagem (Lf) = 3.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100)^4) / 12$

Inércia da Seção = 8.333333333333335E-6 m⁴

Inércia Necessária = $((\text{Carga Solicitante} / 1000) * f_s * L_f * L_f) / (\text{PI} * \text{PI} * E_{cef})$

Inércia Necessária = 1.0132118364233778E-6 m⁴

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Tensão Atuante (Tat) = (Carga Solicitante / 1000) / ((Base/100)²)

Tat = 0.35 MPa

Fcd = (kmod * Fc0,k) / 1.4

Fcd = 9.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é <= Resistência à Compressão de Projeto do Material (Fcd):

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Pilar 4 (Pavimento 1)

Carga Solicitante = 3.50 KN

Comprimento de Flambagem (Lf) = 3.0 m

Inércia da Seção = ((Base/100) ^ 4) / 12

Inércia da Seção = 8.333333333333335E-6 m⁴

Inércia Necessária = ((Carga Solicitante / 1000) * fs * Lf * Lf) / (PI * PI * Ecef)

Inércia Necessária = 1.0132118364233778E-6 m⁴

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Tensão Atuante (Tat) = (Carga Solicitante / 1000) / ((Base/100)²)

Tat = 0.35 MPa

Fcd = (kmod * Fc0,k) / 1.4

Fcd = 9.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é <= Resistência à Compressão de Projeto do Material (Fcd):

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Pilar 1 (Pavimento 2)

Carga Solicitante = 1.75 KN

Comprimento de Flambagem (Lf) = 3.0 m

Inércia da Seção = ((Base/100) ^ 4) / 12

Inércia da Seção = 8.333333333333335E-6 m⁴

Inércia Necessária = ((Carga Solicitante / 1000) * fs * Lf * Lf) / (PI * PI * Ecef)

Inércia Necessária = 5.066059182116889E-7 m⁴

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Tensão Atuante (Tat) = (Carga Solicitante / 1000) / ((Base/100)²)

Tat = 0.17 MPa

Fcd = (kmod * Fc0,k) / 1.4

Fcd = 9.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência à Compressão de Projeto do Material (Fcd):
Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Pilar 2 (Pavimento 2)

Carga Solicitante = 1.75 KN

Comprimento de Flambagem (Lf) = 3.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100)^4) / 12$

Inércia da Seção = $8.333333333333335E-6 \text{ m}^4$

Inércia Necessária = $((\text{Carga Solicitante} / 1000) * f_s * L_f * L_f) / (\text{PI} * \text{PI} * E_{cef})$

Inércia Necessária = $5.066059182116889E-7 \text{ m}^4$

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Tensão Atuante (Tat) = $(\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base}/100)^2)$

Tat = 0.17 MPa

Fcd = $(k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$

Fcd = 9.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência à Compressão de Projeto do Material (Fcd):
Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Pilar 3 (Pavimento 2)

Carga Solicitante = 1.75 KN

Comprimento de Flambagem (Lf) = 3.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100)^4) / 12$

Inércia da Seção = $8.333333333333335E-6 \text{ m}^4$

Inércia Necessária = $((\text{Carga Solicitante} / 1000) * f_s * L_f * L_f) / (\text{PI} * \text{PI} * E_{cef})$

Inércia Necessária = $5.066059182116889E-7 \text{ m}^4$

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Tensão Atuante (Tat) = $(\text{Carga Solicitante} / 1000) / ((\text{Base}/100)^2)$

Tat = 0.17 MPa

Fcd = $(k_{mod} * F_{c0,k}) / 1.4$

Fcd = 9.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é \leq Resistência à Compressão de Projeto do Material (Fcd):
Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Pilar 4 (Pavimento 2)

Carga Solicitante = 1.75 KN

Comprimento de Flambagem (Lf) = 3.0 m

Inércia da Seção = $((\text{Base}/100)^4) / 12$

Inércia da Seção = 8.333333333333335E-6 m⁴

Inércia Necessária = ((Carga Solicitante / 1000) * fs * Lf * Lf) / (PI * PI * Ecef)

Inércia Necessária = 5.066059182116889E-7 m⁴

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Tensão Atuante (Tat) = (Carga Solicitante / 1000) / ((Base/100)²)

Tat = 0.17 MPa

Fcd = (kmod * Fc0,k) / 1.4

Fcd = 9.00 MPa

Como a Tensão Atuante (Tat) é <= Resistência à Compressão de Projeto do Material (Fcd):

Seção Mínima do Pilar = 10x10cm

Resumo - Seções Mínimas

Elemento	Pavimento	Seção Mínima
Viga 1	Pavimento 1	5x15cm
Viga 2	Pavimento 1	5x11cm
Viga 3	Pavimento 1	5x15cm
Viga 4	Pavimento 1	5x11cm
Viga 1	Pavimento 2	5x15cm
Viga 2	Pavimento 2	5x11cm
Viga 3	Pavimento 2	5x15cm
Viga 4	Pavimento 2	5x11cm
Pilar 1	Pavimento 1	10x10cm
Pilar 2	Pavimento 1	10x10cm
Pilar 3	Pavimento 1	10x10cm
Pilar 4	Pavimento 1	10x10cm
Pilar 1	Pavimento 2	10x10cm
Pilar 2	Pavimento 2	10x10cm
Pilar 3	Pavimento 2	10x10cm
Pilar 4	Pavimento 2	10x10cm

Estimativa de Custos

Descrição	Comprimento	P. Unit (R\$)	Quantidade	P. Total (R\$)
Viga 5x15 cm de Garapeira	4.0 metro(s)	199.80	4	799.20
Viga 5x11 cm de Garapeira	3.0 metro(s)	109.95	4	439.80
Quadrado 15x15 cm de Cambará	3.0 metro(s)	335.40	8	2683.20
-	-	-	16	3922.20

Observação: A seção dessa estimativa corresponde a seção igual ou imediatamente superior a calculada, conforme disponibilidade comercial presente no software. Caso não conste seção comercial para determinado resultado de cálculo, o item (peça) não será gerado na tabela.