

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS DO SERTÃO  
DELMIRO GOUVEIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DAMIÃO DO NASCIMENTO BARBOZA

**DESENVOLVIMENTO E APRIMORAMENTO DE UMA FERRAMENTA  
COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO NAS DISCIPLINAS DE CÁLCULO  
NUMÉRICO, MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO E ESTRUTURAS DE MADEIRA**

Delmiro Gouveia/AL

2024

DAMIÃO DO NASCIMENTO BARBOZA

**DESENVOLVIMENTO E APRIMORAMENTO DE UMA FERRAMENTA  
COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO NAS DISCIPLINAS DE CÁLCULO  
NUMÉRICO, MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO E ESTRUTURAS DE MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Alagoas, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharelado em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alverlando Silva Ricardo.

Delmiro Gouveia/AL

2024

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca do Campus Sertão**  
**Sede Delmiro Gouveia**

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4 2209

B239d Barboza, Damião do Nascimento

Desenvolvimento e aprimoramento de uma ferramenta computacional para auxílio nas disciplinas de cálculo numérico, materiais da construção e estruturas de madeira / Damião do Nascimento Barboza. - 2024.

72 f. : il.

Orientação: Alverlando Silva Ricardo.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.  
Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2024.

1. Engenharia Civil. 2. Ferramenta computacional. 3. Estrutura de madeira. 4. Dosagem de concreto. 5. Cálculo numérico. 6. Materiais de construção. 7. MecTool. 8. Python. 9. Ensino e aprendizagem. I. Ricardo, Alverlando Silva, orient. II. Título.

CDU: 624.012.45

## Folha de Aprovação

DAMIÃO DO NASCIMENTO BARBOZA

DESENVOLVIMENTO E APRIMORAMENTO DE UMA FERRAMENTA  
COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO NAS DISCIPLINAS DE CÁLCULO NUMÉRICO,  
MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO E ESTRUTURAS DE MADEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
banca examinadora do curso de Engenharia  
Civil da Universidade Federal de Alagoas e  
aprovada em 21 de novembro de 2024.

---

(Orientador – Prof. Dr., Alverlando Silva Ricardo, UFAL)

### **Banca examinadora:**

---

(Examinador Interno – Prof. Dr., Wendell José Soares dos Santos, UFAL)

---

(Examinador Interno – Prof. Dr., Marcelo Amanajás Pires, UFAL)

Aos meus pais, Eva Barboza e Bartolomeu Barboza, que, sob muito sol, me fizeram chegar aqui, na sombra.

## **AGRADECIMENTOS**

Acima de tudo, à Deus, por tudo.

A minha família por todo apoio e incentivo, em especial aos meus pais, meus avós e minhas irmãs.

Ao meu orientador por todos os ensinamentos, ajuda e atenção dedicada.

A todos os meus colegas de faculdade que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento desta pesquisa, com um agradecimento especial ao Guilherme Cardial.

Agradeço sinceramente a todos os meus amigos de faculdade, cujas contribuições foram essenciais para que eu alcançasse este momento especial. Em particular, gostaria de mencionar Júlio Neri, Ana Bárbara, Michael Nunes, Hiago Albuquerque e tantos outros que estiveram ao meu lado, sempre presentes nos trabalhos em grupo.

A todos os membros do grupo PET Engenharias por apoio, aprendizado e carinho durante a graduação.

“Se você pode sonhar, você pode realizar.”  
(Walt Disney).

## RESUMO

Na área de engenharia civil, estudantes e profissionais podem enfrentar desafios complexos que demandam análises estruturais e cálculos detalhados em disciplinas como Estruturas de Madeira, Materiais de Construção e Cálculo Numérico. O uso de ferramentas computacionais torna-se indispensável para otimizar o tempo de resolução e reduzir erros. No entanto, apesar do avanço tecnológico, muitos softwares especializados ainda apresentam limitações importantes. Especificamente, ferramentas aplicadas no dimensionamento de Estruturas de Madeira enfrentam dificuldades na consideração de cargas variáveis e na atualização normativa, enquanto que softwares de dosagem de concreto mostram falhas, como incertezas nos resultados e dependência de conexão com a internet. No campo do Cálculo Numérico, muitas ferramentas são restritas a problemas específicos, como o cálculo de raízes de polinômios. Visando superar essas limitações, este trabalho propõe a atualização e aprimoramento do MecTool, uma ferramenta computacional desenvolvida para aplicações em Mecânica dos Sólidos e Geotecnia. A nova versão do MecTool integra funcionalidades para Estruturas de Madeira, Materiais de Construção e Cálculo Numérico, oferecendo uma solução mais abrangente e precisa. Desenvolvido em Python, o MecTool foi validado por meio da resolução de problemas encontrados na literatura e comparado com os resultados de outras ferramentas. Os resultados demonstram alta precisão, com erros percentuais próximos de 0%, comprovando a confiabilidade da ferramenta proposta.

**Palavras-chave:** mectool; python; estruturas de madeira; cálculo numérico; dosagem de concreto.

## ABSTRACT

In the field of civil engineering, students and professionals face complex challenges that require detailed structural and mathematical analyses in subjects such as Timber Structures, Construction Materials, and Numerical Calculation. Computational tools have become essential for optimizing resolution time and minimizing errors. However, despite technological advancements, many specialized software applications still exhibit significant limitations. Specifically, tools for Timber Structures struggle with accounting for variable loads and maintaining updated standards, while concrete mix design software displays issues such as inaccuracies and internet dependency. In the field of Numerical Calculation, many tools are limited to specific problems, such as focusing solely on polynomial root calculations. To address these limitations, this work proposes the update and enhancement of MecTool, a computational tool developed for applications in Solid Mechanics and Geotechnics. The new version of MecTool incorporates functionalities for Timber Structures, Construction Materials, and Numerical Calculation, providing a more comprehensive and accurate solution. Developed in Python, MecTool was validated through the solution of benchmark problems from the literature and comparisons with results from other tools. The results demonstrate high precision, with percentage errors close to 0%, confirming the reliability of the proposed tool.

**Keywords:** MecTool; Python; timber structures; numerical calculation; concrete mix design.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Tela de entrada da primeira versão do MecTool.....                                                                          | 17 |
| <b>Figura 2:</b> Gráfico para determinação da relação a/c em função das resistências do concreto aos 28 dias de idade.....                   | 20 |
| <b>Figura 3:</b> Dimensões mínimas para peça isolada.....                                                                                    | 22 |
| <b>Figura 4:</b> Fluxograma de caracterização das propriedades de resistência e rigidez.....                                                 | 22 |
| <b>Figura 5:</b> Fluxograma de metodologia.....                                                                                              | 32 |
| <b>Figura 6:</b> Aba de dados de entrada para dimensionamento de pilares de madeira.....                                                     | 40 |
| <b>Figura 7:</b> Aba de dados de entrada para dimensionar de pilares de madeira.....                                                         | 42 |
| <b>Figura 8:</b> Aba de dados de entrada e saída para dimensionamento de vigas em situação de incêndio pelo método das seções reduzidas..... | 43 |
| <b>Figura 9:</b> Aba de dados de entrada e saída para dosagem de concreto convencional.....                                                  | 44 |
| <b>Figura 10:</b> Ajuste 01.....                                                                                                             | 47 |
| <b>Figura 11:</b> Ajuste 02.....                                                                                                             | 47 |
| <b>Figura 12:</b> Ajuste 03.....                                                                                                             | 48 |
| <b>Figura 13:</b> Ajuste 04.....                                                                                                             | 48 |
| <b>Figura 14:</b> Ajuste 05.....                                                                                                             | 49 |
| <b>Figura 15:</b> Ajuste 06.....                                                                                                             | 49 |
| <b>Figura 16:</b> Ajuste 07.....                                                                                                             | 50 |
| <b>Figura 17:</b> Aba de dados de entrada e saída para dimensionamento de pilares de madeira....                                             | 55 |
| <b>Figura 18:</b> Aba de dados de entrada e saída para dimensionamento de vigas de madeira em situação de incêndio.....                      | 57 |
| <b>Figura 19:</b> Aba de dados de entrada e saída para dosagem de concreto convencional para o problema de Aguiar e Silva (2023).....        | 58 |
| <b>Figura 20:</b> Aba de dados de entrada e saída para dosagem de concreto convencional para o problema de Euzébio e Pereira (2021).....     | 58 |
| <b>Figura 21:</b> Aba destinada à representação binária.....                                                                                 | 67 |
| <b>Figura 22:</b> Aba destinada ao método da Bisseção.....                                                                                   | 67 |
| <b>Figura 23:</b> Aba destinada ao método das Cordas.....                                                                                    | 68 |
| <b>Figura 24:</b> Aba destinada ao método de Newton.....                                                                                     | 68 |
| <b>Figura 25:</b> Aba destinada ao método da secante.....                                                                                    | 69 |
| <b>Figura 26:</b> Aba destinada ao método da eliminação gaussiana.....                                                                       | 69 |
| <b>Figura 27:</b> Aba destinada ao método de Gauss Jacobi.....                                                                               | 70 |
| <b>Figura 28:</b> Aba destinada ao ajuste polinomial.....                                                                                    | 70 |
| <b>Figura 29:</b> Aba destinada à regra do trapézio.....                                                                                     | 71 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 01:</b> Diferença média entre os valores encontrados pelo MecTool e por outros softwares ou autores.....                           | 18 |
| <b>Tabela 02:</b> Classe de umidade.....                                                                                                     | 21 |
| <b>Tabela 03:</b> Classes de resistência de espécies de floresta nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos.....    | 23 |
| <b>Tabela 04:</b> Classes de resistência de coníferas.....                                                                                   | 24 |
| <b>Tabela 05:</b> Classes de resistência de folhosas (dicotiledôneas).....                                                                   | 25 |
| <b>Tabela 06:</b> Parâmetros de entrada para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira sob compressão simples.....               | 35 |
| <b>Tabela 07:</b> Parâmetros de entrada para o dimensionamento de vigas sob flexão simples pelo método das seções reduzidas.....             | 36 |
| <b>Tabela 08:</b> Parâmetros de entrada para o dimensionamento de vigas sob flexão simples pelo método das propriedades reduzidas.....       | 37 |
| <b>Tabela 09:</b> Parâmetros de entrada para a dosagem de concreto convencional pelo método da ABCP.....                                     | 38 |
| <b>Tabela 10:</b> Parâmetros de entrada para métodos numéricos.....                                                                          | 39 |
| <b>Tabela 11:</b> Coordenadas para os ajustes.....                                                                                           | 46 |
| <b>Tabela 12:</b> Constantes K1 e K2 para cada tipo de cimento.....                                                                          | 50 |
| <b>Tabela 13:</b> Consumo aproximado de água.....                                                                                            | 51 |
| <b>Tabela 14:</b> Volume de agregado graúdo compactado por m <sup>3</sup> de concreto.....                                                   | 52 |
| <b>Tabela 15:</b> Comparação entre valores obtidos por outros softwares e autores e pelo MecTool para um pilar de madeira.....               | 56 |
| <b>Tabela 16:</b> Comparativo entre valores obtidos por outros softwares e autores e pelo MecTool para dosagem de concreto convencional..... | 59 |
| <b>Tabela 17:</b> Comparativo entre resultados obtidos no MecTool com a literatura para problemas de Cálculo Numérico. (continua).....       | 60 |
| <b>Tabela 18:</b> Comparativo entre resultados obtidos no MecTool com a literatura para problemas de Cálculo Numérico. (continuação).....    | 61 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                  |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                                           | <b>14</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS GERAIS.....                                                                            | 15        |
| 1.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                                                       | 15        |
| 1.3      | ESTRUTURA DO TRABALHO.....                                                                       | 16        |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                                                                  | <b>17</b> |
| 2.1      | MecTool.....                                                                                     | 17        |
| 2.2      | LINGUAGEM PYTHON.....                                                                            | 18        |
| 2.3      | MÉTODO ABCP.....                                                                                 | 19        |
| 2.4      | DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA.....                                         | 20        |
| 2.4.1    | <i>Dimensionamento de vigas e pilares de madeiras pela NBR 7190 (2022)</i> .....                 | 20        |
| 2.4.2    | <i>Dimensionamento de vigas em situação de incêndio</i> .....                                    | 26        |
| 2.4.2.1  | <b>Método das Propriedades Reduzidas</b> .....                                                   | 26        |
| 2.4.2.2  | <b>Método das Seções Reduzidas</b> .....                                                         | 26        |
| 2.5      | CÁLCULO NUMÉRICO.....                                                                            | 27        |
| 2.5.1    | <i>Representação binária</i> .....                                                               | 28        |
| 2.5.2    | <i>Método da Bisseção</i> .....                                                                  | 28        |
| 2.5.3    | <i>Método das Cordas</i> .....                                                                   | 29        |
| 2.5.4    | <i>Método de Newton</i> .....                                                                    | 29        |
| 2.5.5    | <i>Método das secantes</i> .....                                                                 | 30        |
| 2.5.6    | <i>Eliminação Gaussiana</i> .....                                                                | 30        |
| 2.5.7    | <i>Método de Gauss-Jacobi</i> .....                                                              | 30        |
| 2.5.8    | <i>Ajuste polinomial</i> .....                                                                   | 31        |
| 2.5.9    | <i>Método do Trapézio</i> .....                                                                  | 31        |
| 2.5.10   | <i>Método de Simpson</i> .....                                                                   | 31        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                                                          | <b>32</b> |
| 3.1      | LEVANTAMENTO DE SOFTWARES.....                                                                   | 32        |
| 3.2      | LEVANTAMENTO DE NOVAS FUNÇÕES.....                                                               | 33        |
| 3.3      | DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA.....                                                         | 34        |
| 3.3.1    | <i>Dimensionamento de elementos estruturais de madeira submetidos a compressão simples</i> ..... | 34        |
| 3.3.2    | <i>Dimensionamento de vigas sob flexão simples em situação de incêndio</i> .....                 | 35        |
| 3.3.3    | <i>Dosagem de concreto convencional pelo método ABCP</i> .....                                   | 37        |
| 3.3.4    | <i>Métodos numéricos</i> .....                                                                   | 38        |
| 3.4      | DESENVOLVIMENTO DAS NOVAS FUNCIONALIDADES: CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA.....                     | 40        |
| 3.4.1    | <i>Elementos estruturais de madeira</i> .....                                                    | 40        |
| 3.4.2    | <i>Dosagem de concreto convencional pelo método ABCP</i> .....                                   | 44        |
| 3.4.2.1  | <b>Fator água/cimento</b> .....                                                                  | 44        |
| 3.4.2.2  | <b>Determinação do Consumo de água (Ca)</b> .....                                                | 51        |
| 3.4.2.3  | <b>Determinação do consumo de cimento Cc</b> .....                                               | 51        |
| 3.4.2.4  | <b>Determinação do consumo de brita (agregado graúdo) Cb</b> .....                               | 51        |
| 3.4.2.5  | <i>Determinação do consumo de areia Cm</i> .....                                                 | 52        |
| 3.4.2.6  | <b>Apresentação do traço médio e traço de obra</b> .....                                         | 53        |
| 3.4.3    | <i>Métodos numéricos</i> .....                                                                   | 54        |

|          |                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5      | VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA.....                           | 54        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS.....</b>                                 | <b>55</b> |
| 4.1      | ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA.....                  | 55        |
| 4.2      | DOSAGEM DE CONCRETO CONVENCIONAL PELO MÉTODO ABCP..... | 57        |
| 4.3      | MÉTODOS NUMÉRICOS.....                                 | 59        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                  | <b>62</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                | <b>64</b> |
|          | <b>APÊNDICES.....</b>                                  | <b>66</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Diariamente alunos e profissionais do ramo da engenharia civil lidam com diversos problemas complexos envolvendo análises estruturais e matemáticas detalhadas. Esses desafios, relacionados a disciplinas como Estruturas de Madeira, Materiais da Construção e até Cálculo Numérico, exigem um certo nível de conhecimento e uma quantidade significativa de tempo para serem resolvidos. Nesse sentido, o uso de ferramentas computacionais pode se tornar um grande aliado para redução de tempo e erros.

Embora o desenvolvimento de programas de computador, em geral, tenha acompanhado a crescente evolução do setor da tecnologia da informação na última década, os softwares produzidos para suporte nas áreas supracitadas deixam algumas lacunas. Quando se trata de Estruturas de Madeira, a implementação da ferramenta realizada no trabalho de Oliveira (2022), por exemplo, não leva em consideração as cargas variáveis atuantes tampouco os coeficientes de majoração dos carregamentos, não possui interface gráfica e exige um interpretador de linha de comando para inserção dos dados. Já a ferramenta desenvolvida por Silva e Pravia (2018), apesar de possuir uma interface gráfica amigável, baseia o dimensionamento de peças de madeira em uma versão obsoleta da norma de projeto de estruturas de madeira, a NBR/2012.

De forma semelhante, os programas voltados para a dosagem de concreto convencional deixam a desejar em alguns aspectos. Em seu trabalho, Aguiar e Silva (2023) apontam inexatidões nos cálculos do aplicativo oriundos de seus estudos. Já o TraçoFácil, ferramenta online desenvolvida por Euzébio e Pereira (2021), apresenta dependência de conexão com a internet. Da mesma forma, a área de Cálculo Numérico apresenta apenas softwares voltados para problemas específicos, não abrangendo os diversos conceitos estudados nessa área, como é o caso da ferramenta RaizCalc, fruto do trabalho de Paulista *et al.* (2018), focada apenas no cálculo de raízes de polinômios.

Nesta conjuntura, observa-se que mesmo as ferramentas computacionais mais conhecidas e utilizadas no meio acadêmico podem apresentar limitações. Pinto *et al.* (2016) desenvolveram um programa para o cálculo do Círculo de Mohr nos estados planos de tensão e deformação, assim como no estado geral de tensões. Porém, a ferramenta online da plataforma NEV (IFSP, 2015) não consegue localizar com precisão pontos intermediários no círculo de Mohr, apontando apenas as tensões principais. Da mesma forma, o software e-Mohr (Martha *et al.*, 2004) fornece as tensões principais, tensão de cisalhamento máximo e

planos principais, mas não informa com precisão os valores intermediários no gráfico, exceto com alteração manual de valores, tornando a visualização não imediata. Além disso, trabalha apenas com o estado plano de tensões, não sendo útil para o estado geral de tensões.

O software Ftool (Martha, 2015) versão 3.01 calcula reações de apoio em eixos estaticamente indeterminados submetidos a esforços normais. No entanto, utiliza uma metodologia diferente da abordada nas disciplinas básicas de mecânica dos sólidos, resultando em algumas diferenças nos resultados. Ainda assim, não é possível trabalhar com esforços de torção nesse tipo de sistema de maneira simples. Contadini (2018) desenvolveu uma ferramenta adicional para a plataforma NEV, focada no cálculo do acréscimo de tensões no solo. Contudo, limita-se a cargas pontuais, cargas lineares sem inclinação em relação ao eixo vertical e áreas retangulares uniformemente carregadas, não abordando outros tipos de cargas ou faixas de carga crescentes ou uniformes.

Desse modo, automatizar eficientemente os procedimentos mencionados torna-se imprescindível para tornar esses cálculos mais precisos, evitar erros e, principalmente, reduzir significativamente o tempo para a obtenção dos resultados desejados. Isso fundamenta, no presente trabalho, o desenvolvimento de uma nova versão do MecTool, ferramenta computacional, produzido inicialmente por Silva (2021) para as áreas de Mecânica dos Sólidos e Geotecnia, com o objetivo de inserir a automação supracitada nas áreas de Estruturas de Madeira, Materiais da Construção e Cálculo Numérico.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo atualizar a ferramenta do MecTool inserindo abas referentes às áreas de Materiais de Construção, Estruturas de Madeira e Cálculo Numérico, com o propósito de torná-lo mais abrangente no meio acadêmico e profissional.

## **1.1 Objetivos Gerais**

Atualizar a ferramenta computacional MecTool, inserindo funcionalidades relacionadas às áreas de Materiais de Construção, Estruturas de Madeira e Cálculo Numérico.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver o código da nova versão do software;
- Apresentar a confiabilidade da ferramenta desenvolvida.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

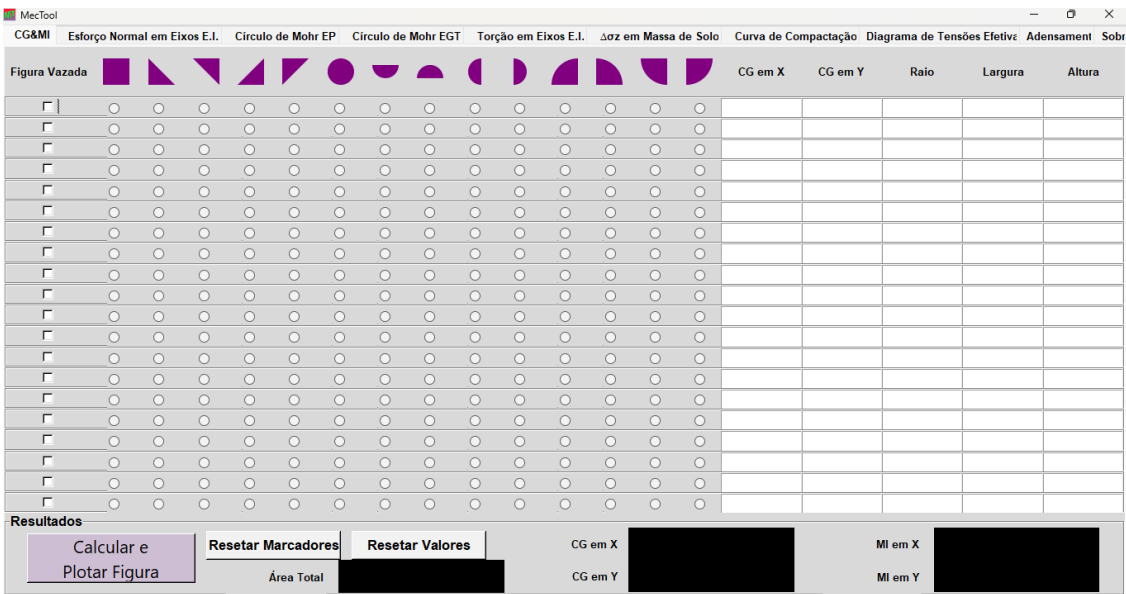
O restante do artigo encontra-se organizado em mais três capítulos. No Capítulo 2, realiza-se uma revisão bibliográfica com os conteúdos necessários para a compreensão da ferramenta. No Capítulo 3, apresentam-se os procedimentos utilizados para a atualização do software. E, por fim, no Capítulo 4, encontra-se a discussão dos resultados obtidos. A última seção consiste nas considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MecTool

A ferramenta computacional MecTool, desenvolvida com o objetivo de auxiliar em cálculos abrangendo a determinação de parâmetros relacionados às áreas de Mecânica dos Sólidos e Mecânica dos Solos (Silva, 2021), apresenta rotas e interface gráfica intuitiva programadas em Python, sendo capaz de resolver problemas envolvendo, por exemplo, círculo de Mohr, centro de gravidade, momento de inércia, diagrama de tensões, esforços em eixos estaticamente indeterminados, diagrama de tensões verticais efetivas, adensamento do solo e acréscimo de tensões em massa de solo. A Figura 1 ilustra a tela de entrada do software, onde os diversos botões localizados na parte superior permitem o acesso a todas as funcionalidades.

Figura 1:Tela de entrada da primeira versão do MecTool.



Fonte: Autor, 2024.

O objetivo principal da primeira versão do MecTool é apoiar o aprendizado dos alunos nas disciplinas de Mecânica dos Sólidos e Mecânica dos Solos, fornecendo um ambiente prático e interativo que facilita a compreensão dos conceitos teóricos. A simplicidade com a qual os dados de entrada do sistema podem ser inseridos dá celeridade ao processo de obtenção dos resultados.

A eficiência do software é atestada através de uma série de testes comparativos envolvendo outros programas amplamente reconhecidos na área. Esses testes apontam para

uma diferença média de apenas 0,48% em relação às demais ferramentas (Silva, 2021). Tal precisão demonstra a confiabilidade e a robustez do software desenvolvido. A Tabela 01 ilustra detalhadamente as verificações realizadas para cada rota, evidenciando a consistência dos resultados obtidos e reforçando a validade dos testes conduzidos.

**Tabela 01:** Diferença média entre os valores encontrados pelo MecTool e por outros softwares ou autores.

| <b>Aba</b>                                           | <b>Diferença média</b> |
|------------------------------------------------------|------------------------|
| Centro de gravidade e momento de inércia             | 0,0205%                |
| Esforço normal em eixos estaticamente indeterminados | 0                      |
| Círculo de Mohr nos estados planos                   | 0,0016%                |
| Círculo de Mohr no estado geral de tensões           | 0%                     |
| Torção em eixos estaticamente indeterminados         | 0,0209%                |
| Acréscimo de tensões verticais em massa de solo      | 0,1397%                |
| Curva de compactação                                 | 0,05%                  |
| Diagrama de tensões efetivas                         | 0%                     |
| Adensamento do solo                                  | 0,4828%                |

**Fonte:** Silva, 2021.

## 2.2 Linguagem Python

O Python é uma linguagem de alto nível, de código aberto, de uso geral e muito popular pela simplicidade em sua sintaxe (Souza et.al, 2022). Trata-se de uma linguagem bastante utilizada para tratamento de dados e estatística, uma concorrente direta do R, devido a sua versatilidade e ainda ganha vantagens sobre outras linguagens quando se trata da quantidade de módulos que acompanha nativamente sem a necessidade de instalações externas (Silva, 2021).

Apesar de o Python não ser a linguagem mais adequada para o desenvolvimento desktop devido ao desempenho superior de outras linguagens como JAVA, C++ e C# (Alsarraf, 2019) ele ganha vantagem quando se trata de sintaxe amigável e enxuta, permite um tempo de desenvolvimento muito menos demorado e mais eficiente em questões de

manutenção do código quando comparada com outras linguagens (Rawat, 2020). A ampla quantidade de bibliotecas, módulos e documentações sobre códigos relacionados a problemas matemáticos e estatísticos é outro fator que torna essa linguagem favorita para esse tipo de desenvolvimento.

### 2.3 Método ABCP

O método ABCP refere-se a metodologia de dosagem de concreto convencional desenvolvida pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP por meio do Eng. Públio Penna Firme Rodrigues (1998). Trata-se de um modelo adaptado às condições brasileiras do método norte-americano proposto inicialmente pela Norma ACI 211.1 (1981). O método ABCP deve ser aplicado observando ainda a ABNT NBR 7211 (2022) e a ABNT NBR 12655 (2022), as quais tratam, respectivamente, de requisitos de agregados para concreto e do preparo e controle de concreto de cimento Portland (ABNT, 2022).

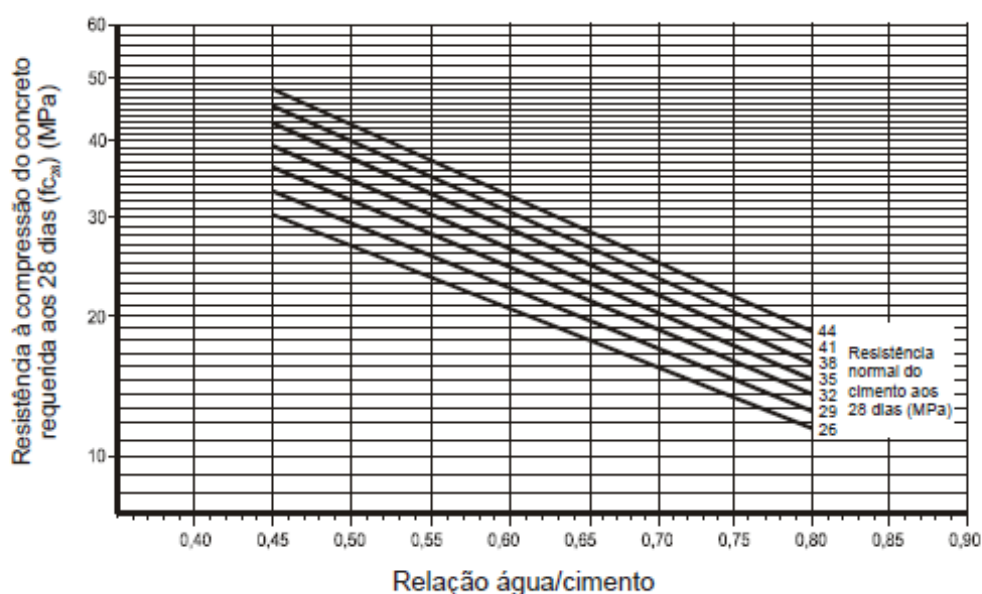
O emprego desse método baseia-se no uso de tabelas e quadros retirados da ABNT NBR 12655 (2022), com valores médios, que possibilita o desenvolvimento de um roteiro para o cálculo dos fatores necessários para a obtenção do traço ideal como consumo de água, consumo de cimento, consumo de areia e consumo de brita.

Além das tabelas e quadros, o método ABCP incorpora a Lei de Abrams, que destaca a influência crucial da relação água/cimento na formulação do concreto. Desenvolvida por Duff Abrams (1919) e revisada por Rodrigues (1998), essa lei demonstra que o fator água/cimento afeta de maneira significativa a resistência do concreto, tornando-se quase exclusivamente dependente desse parâmetro. Quando concretos são produzidos com os mesmos materiais e sob condições idênticas, sua resistência mecânica segue o comportamento previsto pela lei empírica de Abrams (Rodrigues, 1998), conforme representado na expressão a seguir.

$$F_{cj} = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad \text{Lei de Abrams}$$

Onde  $F_{cj}$  refere-se à resistência do concreto aos 28 dias e as constantes  $K_1$  e  $K_2$  dependem do tipo de cimento (Rodrigues, 1998). Para cada tipo de cimento, a Lei de Abrams fornece uma curva. A Figura 2 ilustra as várias curvas para 7 tipos de cimento diferentes.

**Figura 2:** Gráfico para determinação da relação a/c em função das resistências do concreto aos 28 dias de idade.



Fonte: Rodrigues, 1998.

## 2.4 Dimensionamento de elementos estruturais de madeira

### 2.4.1 Dimensionamento de vigas e pilares de madeiras pela NBR 7190 (2022)

O dimensionamento de estruturas de madeiras no Brasil é baseado, e normatizado, pela norma NBR 7190 (2022) - Projeto de estruturas de madeira. Desse modo, a norma estabelece as diretrizes para o projeto de estruturas de madeira em todo o país, fornecendo critérios e recomendações para o dimensionamento e o uso de madeira em diversas aplicações, como construções civis, estruturas rurais, pontes, postes, entre outras.

A norma em questão adota o método do Estado Limite Último (ELU), que consiste em comparar as tensões resistentes máximas da madeira com as tensões solicitantes decorrentes das cargas aplicadas. Uma das principais premissas para o dimensionamento é garantir que as tensões resistentes sejam sempre superiores às tensões solicitantes, assegurando assim a segurança da estrutura.

Entre os principais parâmetros considerados pela NBR 7190 (2022) para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira, destacam-se:

### ➤ Durabilidade da madeira

Conforme estabelecido pela norma, toda estrutura de madeira deve possuir durabilidade adequada para assegurar uma vida útil que atenda aos requisitos mínimos de segurança e desempenho da edificação. Essa durabilidade é essencial para que a estrutura suporte as condições de uso e exposição ao longo do tempo, garantindo que as exigências funcionais e estéticas da construção sejam mantidas durante todo o seu período de utilização.

Nesse sentido, a norma supracitada adota classes de umidade relacionadas à umidade relativa do ambiente como observado na tabela 02 a seguir.

**Tabela 02:** Classe de umidade.

| <b>Classe de umidade</b> | <b>Umidade relativa do ambiente<br/><math>U_{amb}</math></b> | <b>Umidade de equilíbrio máxima da madeira<br/><math>U_{eq}</math></b> |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 1                        | $U_{amb} \leq 65\%$                                          | 12%                                                                    |
| 2                        | $65\% < U_{amb} \leq 75\%$                                   | 15%                                                                    |
| 3                        | $75\% < U_{amb} \leq 85\%$                                   | 18%                                                                    |
| 4                        | $U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos                     | $\geq 25\%$                                                            |

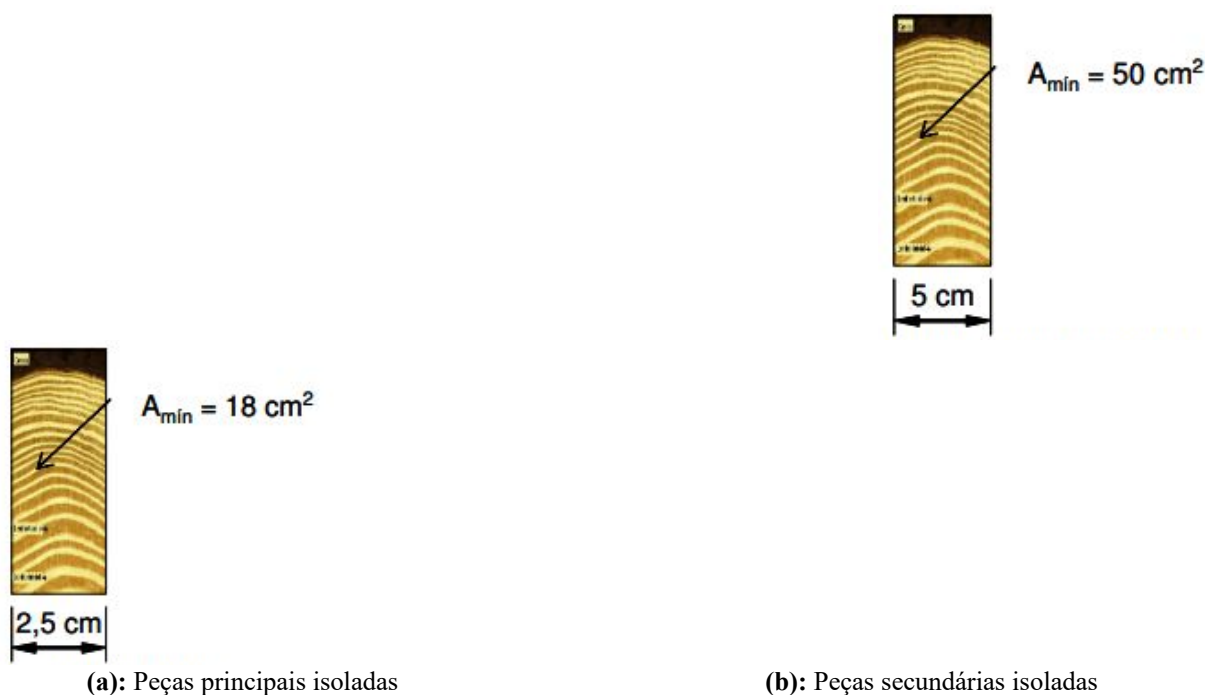
**Fonte:** Modificado da NBR 7190-1 (2022).

De acordo com a NBR 7190 (2022), as classes de umidade visam ajustar as propriedades de resistência e rigidez da madeira de acordo com as condições ambientais a que a estrutura estará exposta ao longo de sua vida útil. Essas classes permitem adequar o dimensionamento da madeira considerando os efeitos da umidade nas propriedades mecânicas do material, assegurando o desempenho estrutural adequado em diferentes ambientes.

### ➤ Dimensões mínimas

A norma brasileira NBR 7190 (2022) estabelece dimensões mínimas para seções transversais dos elementos estruturais, arruelas, espessura de chapas de aço e diâmetros de pinos e cavilhas. Para uma peça isolada como uma viga, as dimensões mínimas estabelecidas por essa norma são mostradas na Figura 3 a seguir.

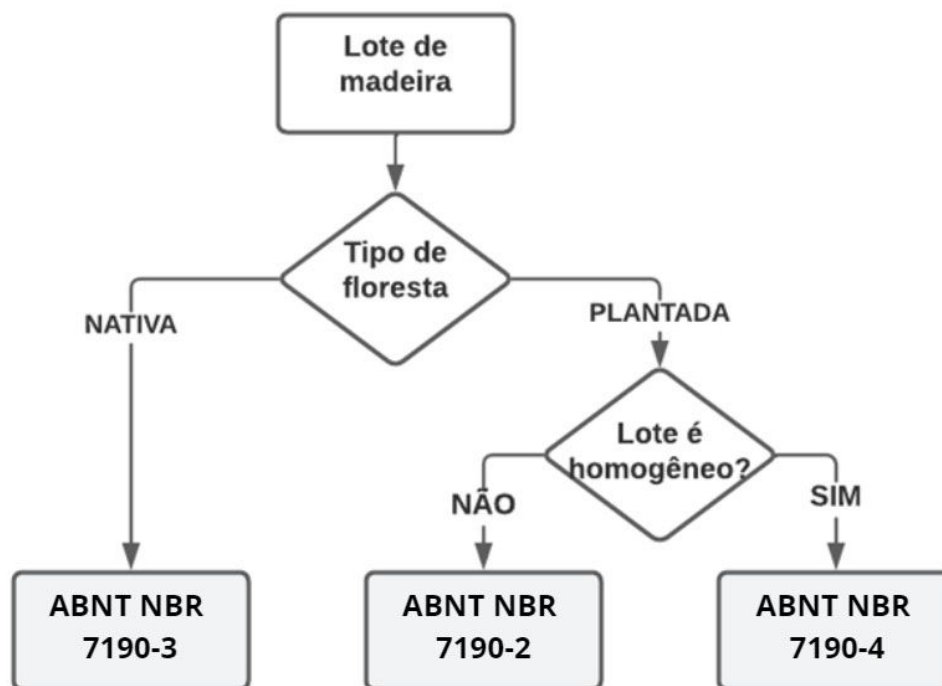
**Figura 3:** Dimensões mínimas para peça isolada.



**Fonte:** Adaptado para a NBR 7190 (2022).

### ➤ Caracterização das propriedades da madeira

Para a caracterização das propriedades de resistência e rigidez da madeira, a NBR 7190 (2022) leva em conta a sua origem, que pode ser extraída de floresta nativa ou advinda de plantações cultivadas, como ilustra a Figura 4.

**Figura 4:** Fluxograma de caracterização das propriedades de resistência e rigidez.

Fonte: NBR 7190, 2022.

Essa caracterização permite a obtenção das classes de resistência das madeiras. Segundo a NBR 7190-1 (2022), a classe de resistência tem por objetivo a utilização de madeiras com propriedades padronizadas, orientando a escolha do material para a elaboração de projetos estruturais. Para tanto, a norma classifica as espécies de árvores em dicotiledôneas e folhosas no caso de florestas plantadas. As classes de resistências são apresentadas nas Tabelas 03, 04 e 05 a seguir.

**Tabela 03:** Classes de resistência de espécies de floresta nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos.

| Classes | $f_{c0k}(MPa)$ | $f_{v0,k}(MPa)$ | $E_{c0,med}(MPa)$ | Densidade a 12%( $kg/m^3$ ) |
|---------|----------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|
| D20     | 20             | 4               | 10000             | 500                         |
| D30     | 30             | 5               | 12000             | 625                         |
| D40     | 40             | 6               | 14500             | 750                         |
| D50     | 50             | 7               | 16500             | 850                         |
| D60     | 60             | 8               | 19500             | 1000                        |

Fonte: Modificado da NBR 7190-1 (2022).

**Tabela 04:** Classes de resistência de coníferas.

|                                            | Simb.   | C14 | C16 | C18 | C20 | C22 | C24 | C27 | C30 | C35 | C40 | C45 | C50 |
|--------------------------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Propriedades de resistência MPa</b>     |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Flexão                                     | fb,k    | 14  | 16  | 18  | 20  | 22  | 24  | 27  | 30  | 35  | 40  | 45  | 50  |
| Tração paralela                            | ft,0,k  | 8   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 16  | 18  | 21  | 24  | 27  | 30  |
| Tração perpendicular                       | ft,90,k | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Compressão paralela                        | fc,0,k  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 25  | 26  | 27  | 29  |
| Compressão perpendicular                   | fc,90,k | 2   | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 |
| Cisalhamento                               | fv,k    | 3   | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| <b>Propriedades de rigidez (GPa)</b>       |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Módulo de elasticidade a 0° médio          | E0,m    | 7   | 8   | 9   | 9,5 | 10  | 11  | 12  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  |
| Módulo de elasticidade a 0° característico | E0,05   | 4,7 | 5,4 | 6   | 6,4 | 6,7 | 7,4 | 7,7 | 8   | 8,7 | 9,4 | 10  | 11  |
| Módulo de elasticidade a 90° médio         | E90,m   | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Módulo de elasticidade transversal médio   | Gm      | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1   |
| <b>Densidade (kg/m³)</b>                   |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Densidade característica                   | ρk      | 290 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 370 | 380 | 400 | 420 | 440 | 460 |
| Densidade média                            | ρm      | 350 | 370 | 380 | 390 | 410 | 420 | 450 | 460 | 480 | 500 | 520 | 550 |

**Fonte:** Modificado da NBR 7190-1, 2022.

**Tabela 05:** Classes de resistência de folhosas (dicotiledôneas).

|                                            | Simb.   | D18 | D24 | D30 | D35 | D40 | D50 | D60 | D70  |
|--------------------------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| <b>Propriedades de resistência MPa</b>     |         |     |     |     |     |     |     |     |      |
| Flexão                                     | fb,k    | 18  | 24  | 30  | 35  | 40  | 50  | 60  | 70   |
| Tração paralela                            | ft,0,k  | 11  | 14  | 18  | 21  | 24  | 30  | 36  | 70   |
| Tração perpendicular                       | ft,90,k | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6  |
| Compressão paralela                        | fc,0,k  | 18  | 21  | 23  | 25  | 26  | 29  | 32  | 34   |
| Compressão perpendicular                   | fc,90,k | 7,5 | 7,8 | 8   | 8,1 | 8,3 | 9,3 | 11  | 13,5 |
| Cisalhamento                               | fv,k    | 3,4 | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4,5 | 5    |
| <b>Propriedades de rigidez (GPa)</b>       |         |     |     |     |     |     |     |     |      |
| Módulo de elasticidade a 0° médio          | E0,m    | 9,5 | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 17  | 20   |
| Módulo de elasticidade a 0° característico | E0,05   | 8   | 8,5 | 9,2 | 10  | 11  | 12  | 14  | 16,8 |
| Módulo de elasticidade a 90° médio         | E90,m   | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1,1 | 1,33 |
| Módulo de elasticidade transversal médio   | Gm      | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 1,25 |
| <b>Densidade (kg/m³)</b>                   |         |     |     |     |     |     |     |     |      |
| Densidade característica                   | ρk      | 475 | 485 | 530 | 540 | 560 | 620 | 700 | 900  |
| Densidade média                            | ρm      | 570 | 580 | 640 | 650 | 660 | 750 | 840 | 1080 |

Fonte: Modificado da NBR 7190-1, 2022.

## **2.4.2 Dimensionamento de vigas em situação de incêndio**

O dimensionamento de vigas de madeira em situação de incêndio é fundamental no projeto de estruturas que devem garantir a segurança e a integridade estrutural durante a exposição ao fogo. Em condições de incêndio, a madeira, apesar de ser um material combustível, apresenta um comportamento específico que deve ser considerado nas análises de dimensionamento. No Brasil, devido à ausência de normas nacionais, utiliza-se o EN 1995-1-2 (1995), o qual aborda os dois métodos principais que são geralmente empregados para avaliar a capacidade estrutural das vigas de madeira durante um incêndio: o método das propriedades reduzidas e o método das seções reduzidas.

### **2.4.2.1 Método das Propriedades Reduzidas**

O método das propriedades reduzidas é uma abordagem que considera a degradação das propriedades mecânicas da madeira à medida que a temperatura aumenta. Este método calcula a resistência da madeira com base em coeficientes de redução que refletem a perda de desempenho do material em função da temperatura. À medida que a madeira é exposta ao calor, suas propriedades físicas, como a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade, diminuem, influenciando diretamente a capacidade de carga das vigas.

O Eurocódigo 5 (EN 1995-1-2), que é a norma europeia para o projeto de estruturas de madeira em situações de incêndio, fornece uma base técnica detalhada para a aplicação desse método. A norma oferece coeficientes de redução específicos para diversas temperaturas, permitindo que os projetistas dimensionem as vigas de madeira considerando a diminuição de suas propriedades mecânicas ao longo do tempo de exposição ao fogo.

No Brasil, embora não exista uma norma específica para o dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio, a NBR 7190 (2022) é a norma de referência para o projeto estrutural de madeira. Em conjunto com essa norma, pode-se utilizar o Eurocódigo 5 como guia para as análises térmicas e mecânicas em cenários de incêndio, considerando a adaptação das práticas internacionais às condições locais.

### **2.4.2.2 Método das Seções Reduzidas**

O método das seções reduzidas, por sua vez, baseia-se no fenômeno da carbonização, onde a madeira exposta ao fogo sofre uma degradação superficial que resulta na perda de

parte da seção transversal da viga. Durante o incêndio, forma-se uma camada carbonizada que, embora não contribua para a resistência estrutural, atua como isolante térmico, retardando o avanço do fogo para as camadas internas da viga.

Para aplicar este método, é necessário calcular a profundidade da carbonização ao longo do tempo e ajustar a seção transversal da viga, considerando apenas a madeira não carbonizada como efetiva para a resistência estrutural. O Eurocódigo 5 fornece equações e tabelas para determinar a taxa de carbonização da madeira e, consequentemente, a seção residual que ainda contribui para a resistência da viga em situação de incêndio.

No contexto brasileiro, a abordagem de seções reduzidas pode ser complementada pelo uso da NBR 7190 (2022), em conjunto com as recomendações do Eurocódigo 5. Embora a norma brasileira não trate diretamente do comportamento da madeira em incêndios, ela serve como base para o dimensionamento estrutural em condições normais, sendo ajustada para considerar os efeitos do incêndio de acordo com as orientações internacionais.

## 2.5 Cálculo Numérico

Pode-se entender o cálculo numérico como a disciplina que estuda as técnicas à solução aproximada de problemas matemáticos. As técnicas aplicadas são de natureza analítica e computacional. Por conseguinte, as principais preocupações no cálculo numérico envolvem a exatidão e desempenho (Humes *et al.*, 1984).

Nesta conjuntura, observa-se a prática usual de simulação computacional de problemas matemáticos, nas mais diversas áreas científicas e tecnológicas, em virtude da evolução da capacidade de computação disponível junto ao desenvolvimento de métodos numéricos (Justo *et al.*, 2020).

Dessa forma, as simulações numéricas constituem-se de um arranjo de vários esquemas numéricos voltados à resolução de problemas específicos como, equações algébricas, equações lineares, interpolar e ajuste de pontos, integrais, equações diferenciais ordinárias, dentre outros (Humes *et al.*, 1984).

A maior parte dos problemas matemáticos são oriundos da necessidade de se resolver problemas da Natureza, uma vez que, problemas da Natureza podem ser descritos através de modelos matemáticos. De modo geral, para a solução de um problema, a primeira etapa consiste em obter um modelo matemático que represente da forma mais conveniente o problema específico, podendo este ser construído a partir de teorias física, químicas, dentre

outras. Dessa forma, para este problema, pode-se obter modelos matemáticos diferentes, a depender do enfoque que será dado, entretanto, os modelos possuem simplificações da realidade que buscam conduzir para um problema matemático solúvel (Humes *et al.*, 1984)

A segunda etapa da solução trata-se da busca por uma solução e neste ponto aplicam-se os métodos numéricos para obter uma solução matemática.

A solução obtida através de métodos numéricos tende a deferir da solução do problema real. Na maior parte das situações aplicam-se aproximações numéricas, visto que, os problemas podem apresentar-se intratáveis dispondo-se apenas de meios puramente analíticos (Justo *et al.*, 2020; Humes *et al.*, 1984).

### 2.5.1 Representação binária

A representação usual dos números é realizada por meio de um sistema de posicionamento na base 10. Entretanto, os computadores, buscando simplificar o funcionamento, operam normalmente na base 2, denominada de base binária (Justo *et al.*, 2020).

Desse modo, os computadores utilizam-se da base binária para representar os números, onde as posições, denominadas de bits, assumem as condições de “verdadeiro” ou “falso”, isto é, 1 ou 0, respectivamente. Sendo assim, os computadores representam os números através de uma quantidade fixa de bits, o que implica em um conjunto finito de números representáveis (Justo *et al.*, 2020). Por conseguinte, os demais números são obtidos por proximidade àqueles conhecidos, provocando assim erros de arredondamento. Um exemplo simples para compreender a aritmética do computador seria o número 2, que possui representação exata, logo  $2^2 = 4$ , todavia,  $\sqrt{3}$  não tem representação finita, logo  $(\sqrt{3})^2 \neq 3$ .

### 2.5.2 Método da Bisseção

O método da bisseção, também denominado de método da dicotomia, trata-se de um processo iterativo para calcular um valor aproximado de uma raiz da função dada, supondo-se que tenha sido obtido um intervalo contendo apenas esta raiz (Humes *et al.*, 1984).

Desse modo, o Teorema de Bolzano sugere um processo simples para obter uma aproximação de uma raiz de uma função. Supondo-se que uma raiz da função  $f$  esteja isolada no interior do intervalo  $[a, b]$  e, portanto  $f(a) \cdot f(b) < 0$ , o processo consiste em dividir o intervalo dado ao meio e por aplicação do Teorema de Bolzano aos subintervalos determinar

qual deles contém a raiz (Humes *et al.*, 1984).

Dessa forma, consistindo em um processo iterativo, o procedimento é repetido para o novo subintervalo até obter-se uma precisão prefixada, ou seja, o intervalo obtido deve ser menor ou igual a duas vezes a precisão desejada.

O método da bisseção possui uma boa propriedade de garantia de convergência, apresentando uma taxa de convergência linear, assim como também fornece uma simples estimativa do erro na aproximação calculada (Justo *et al.*, 2020).

### 2.5.3 Método das Cordas

O método das cordas fundamenta-se no fato de que, comumente, o zero da função localiza-se o mais próximo possível do extremo do intervalo onde a função apresenta o menor valor em módulo (Lira, 2009).

Neste método, impõe-se como condição que precisamente o gráfico de  $f$  seja suave e não mude a concavidade, garantindo, além da existência, a unicidade da raiz no intervalo. Dessa forma, baseia-se na aproximação da raiz da equação por meio da secante (segmentos de reta) que ligam dois pontos do gráfico de  $f$  (Torelli, 2019).

Sendo assim, a estimativa do zero da função  $y = f(x)$  é realizada a partir da reta secante que une os pares extremos  $(a, f(a))$  e  $(b, f(b))$  do intervalo analisado. Por conseguinte, o ponto em que a reta secante interceptar o eixo das abscissas corresponderá à estimativa do zero da função. Para a situação na qual o valor estimado não atende a tolerância prefixada, redefine-se o intervalo de estudo e repete-se o procedimento até obter-se um valor que a tolerância seja verificada (Lira, 2009).

### 2.5.4 Método de Newton

O método de Newton, também denominado de método das tangentes, consiste em um artifício que baseia-se no conceito de derivada, precisamente utilizando uma interpretação geométrica da derivada (Torelli, 2019).

A estimativa do zero da função  $y = f(x)$  é realizada a partir da reta tangente à função em um ponto de partida. Dessa forma, o ponto em que essa reta tangente intercepta o eixo das abscissas corresponde à estimativa do zero da função. À situação na qual o valor estimado não atende a tolerância estabelecida para o problema, repete-se todo o procedimento até que a mesma possa ser verificada (Lira, 2009).

### 2.5.5 Método das secantes

O método de Newton apresenta como uma desvantagem a necessidade de obter-se a derivada  $f'(x)$  e calcular o seu valor a cada iteração. Uma forma de contornar esse problema é substituindo o cálculo da primeira derivada  $f'(x)$  pelo quociente das diferenças, utilizando, por conseguinte, um modelo linear baseado nos dois valores calculados mais recentemente. Dessa forma, substitui-se o valor aproximado da derivada na fórmula de Newton (Justo *et al.*, 2020).

Destarte, o método da secante consiste em calcular as derivadas da matriz Jacobiana de forma aproximada, assemelhando-se ao Método de Newton se for realizada a aproximação da secante à matriz Jacobiana.

### 2.5.6 Eliminação Gaussiana

O método de eliminação gaussiana, também denominado método de escalonamento, consiste em um método utilizado para solucionar sistemas lineares. A sua aplicação é realizada a partir da manipulação do sistema através de determinadas operações elementares, transformando-se a matriz estendida do sistema em uma matriz triangular, denominada também de matriz escalonada do sistema (Justo *et al.*, 2020).

Dessa forma, após a triangulação do sistema, a solução é obtida por meio da substituição regressiva, destacando-se que, estas operações elementares devem preservar a solução do sistema: (I) multiplicação de uma linha por uma constante não nula; (II) substituição de uma linha por ela mesma somada a um múltiplo de outra linha; (III) permutação de duas linhas.

### 2.5.7 Método de Gauss-Jacobi

O método de Jacobi trata-se de um procedimento iterativo utilizado para a resolução de sistemas lineares, apresentando como vantagem sua simplicidade para implementar no computador, quando comparado a métodos como o de eliminação gaussiana, além de estar menos sujeito ao acúmulo de erros de arredondamento (Castilho, 2001). Todavia, destaca-se

que não se aplica a todos os casos, o que implica que nem sempre irá convergir.

Sendo assim, antes para saber se o método pode ser aplicado, utilizado o critério das linhas que, se satisfeito, implica na convergência do método, entretanto, o inverso não é verdadeiro, ou seja, é falso dizer “não satisfaz o critério das linhas então não converge”, pois pode haver situações na quais o método de Gauss-Jacobi funcione, porém não satisfaça o critério das linhas (Castilho, 2001).

### 2.5.8 Ajuste polinomial

Tratando-se de ajuste de curvas, têm-se o caso especial quando o diagrama de dispersão não apresenta as características lineares presentes nos outros tipos de ajuste. Dessa forma, o ajuste polinomial consiste em um caso particular do ajuste linear para funções polinomiais (Justo *et al.*, 2020).

Destarte, o ajuste polinomial é um caso particular do ajuste linear múltiplo, entretanto, aplica-se uma única variável independente.

### 2.5.9 Método do Trapézio

Na integração de funções conhecidas em pontos equidistantes, aplicam-se as fórmulas de Newton-Cotes. A fórmula dos trapézios trata-se de uma fórmula fechada que utiliza os valores da função a ser integrada nos extremos do intervalo de integração (Justo *et al.*, 2020).

Desse modo, a regra do trapézio consiste em aproximar a função  $f(x)$  por um polinômio de grau 1. A denominação do método dá-se devido ao fato de que a região entre o eixo  $x$  e a reta que liga os pontos sobre o gráfico da função nos extremos do intervalo forma um trapézio. O erro da regra do trapézio pode ser obtido a partir da integração do erro da interpolação de Lagrange (Justo *et al.*, 2020).

### 2.5.10 Método de Simpson

O método de Simpson trata-se de uma Fórmula de Newton-Cotes fechada, no qual realiza-se a aproximação em cada sub-intervalo por meio de um polinômio interpolador de 2º grau, ou seja, apresenta um comportamento gráfico de parábola (Justo *et al.*, 2020).

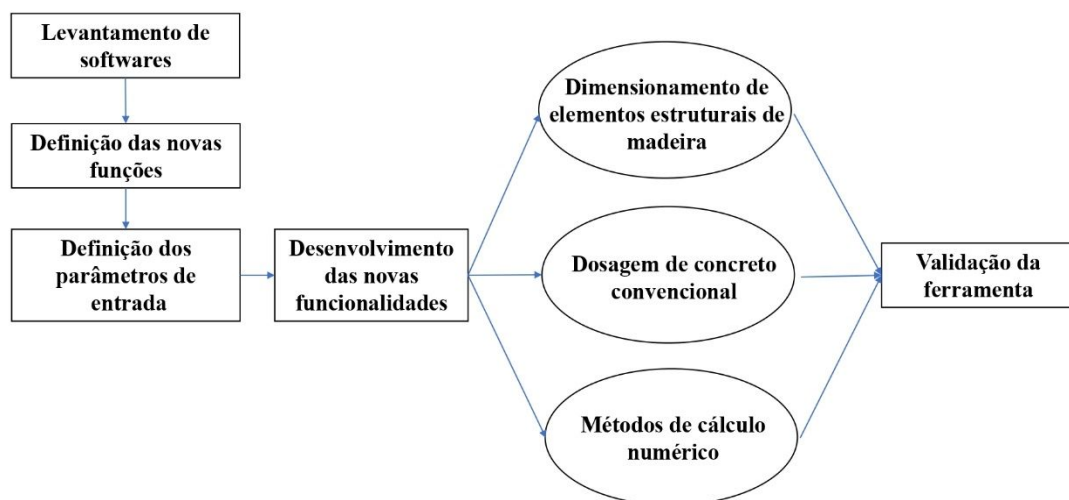
Nesta conjuntura, de modo geral nota-se que o método de Simpson consiste em utilizar um polinômio de 2º grau, isto é, uma função quadrática, para estimar a curva à qual busca-se

obter a integral. Sendo assim, os pontos são assumidos uniformemente espaçados e, para obter a estimativa para a integral, escreve-se o polinômio de 2º grau por meio de três pontos consecutivos e, por fim, integra-se (Justo *et al.*, 2020).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho compreende as etapas de revisão sistemática de ferramentas computacionais com propósitos semelhantes ao MecTool, levantamento das novas atualizações para a segunda versão do MecTool, de definição dos parâmetros de entrada no sistema, o desenvolvimento das novas rotas e interfaces da ferramenta e finalmente a validação da ferramenta. O fluxograma da Figura 5 a seguir ilustra essas etapas por ordem sequencial.

**Figura 5:** Fluxograma de metodologia.



**Fonte:** Autor, 2024.

#### 3.1 Levantamento de softwares

Essa etapa envolveu o levantamento de outras ferramentas computacionais com propósitos análogos aos do MecTool, aplicadas em áreas distintas com o objetivo de apurar lacunas deixadas por outros programas e assim identificar potenciais atualizações a serem implementadas. Dessa forma, essa etapa resultou no Quadro 01 a seguir, que apresenta os dados dos softwares identificados, juntamente com as respectivas lacunas e limitações

observadas.

**Quadro 01:** Ferramentas computacionais levantadas.

| Software           | Autores               | Ano  | Área de aplicação             | Funcionalidades                                     | Limitações                                                                                      |
|--------------------|-----------------------|------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| JWOOD              | Silva e Pravia        | 2018 | Estruturas de madeira         | Dimensionamento de elementos estruturais de madeira | - Cálculos realizados com base em norma depreciada.                                             |
| Sem nomenclatura   | Oliveira              | 2022 | Estruturas de madeira         | Dimensionamento de elementos estruturais de madeira | - Não consideração de cargas variáveis;<br><br>- Ausência de interface gráfica do usuário(gui). |
| AppDosagemConcreto | Aguiar e Silva        | 2023 | Materiais da construção civil | Dosagem de concreto convencional pelo método ABCP   | - Inexatidões na resposta devolvida pela ferramenta.                                            |
| TraçoFácil         | Euzébio e Pereira     | 2021 | Materiais da construção civil | Dosagem de concreto convencional pelo método ABCP   | - Dependência de conexão com rede de internet.                                                  |
| RaizCalc           | Paulista <i>et al</i> | 2018 | Cálculo numérico              | Cálculo de raízes de polinômios                     | - Restrito apenas no cálculo de raízes de polinômios.                                           |

**Fonte:** Autor, 2024.

### **3.2 Levantamento de novas funções**

A definição das novas funções do software foi realizada através de um processo abrangente e colaborativo. Inicialmente, levantou-se possíveis funções a serem implementadas a partir de um estudo de revisão da própria ferramenta.

Posteriormente, foi realizada uma análise minuciosa de outros softwares similares disponíveis no mercado e levantados na etapa anterior, com o intuito de identificar lacunas e limitações que pudessem ser supridas pela nova versão do MecTool. Essa abordagem permitiu não apenas corrigir deficiências existentes, mas também introduzir inovações que tornem o MecTool mais competitivo e eficiente.

Destarte, a etapa inicial culminou na definição de novas funcionalidades para o software, incluindo a automatização dos processos de verificação e dimensionamento de peças estruturais de madeira submetidos a compressão simples, voltados para a área de Estruturas de Madeira. Dimensionamento de vigas em situação de incêndio sob flexão simples, também para a mesma área. Além disso, foi incorporado a dosagem de concreto convencional pelo método da ABCP, atendendo às necessidades da área de Materiais de Construção. Não obstante, para a área de Cálculo Numérico, foram automatizados métodos numéricos avançados compreendendo desde os ajustes polinomiais até as integrações numéricas.

### **3.3 Definição dos parâmetros de entrada**

Os parâmetros de entrada consistem em informações necessárias para que o sistema realize corretamente os cálculos associados a cada rotina. Ademais, é imprescindível que as unidades de medidas retornadas pelo software estejam de acordo com as unidades de medidas inseridas pelo usuário, dessa forma, além da definição dos parâmetros de entrada fora necessário estabelecer todas as unidades de medidas a serem trabalhadas.

Por questões de praticidade e para evitar a poluição visual da ferramenta, alguns parâmetros de entrada serão representados também por siglas ou abreviaturas, enquanto outros exibirão apenas uma descrição mínima e relevante, suficiente para identificar claramente o dado a ser inserido.

#### **3.3.1 Dimensionamento de elementos estruturais de madeira submetidos a compressão simples**

Os parâmetros de entrada para o dimensionamento de pilares e vigas de madeira são determinados pela NBR 7190 (2022). Incluem características geométricas, cargas permanentes e variáveis com seus respectivos coeficientes de majoração, tipo de madeira, classe de umidade e resistência. A Tabela 06 a seguir apresenta detalhadamente todos os parâmetros de entrada necessários bem como as unidades de medidas associadas a ser utilizada para a correta realização dos cálculos para o dimensionamento de vigas e pilares de madeira submetidos a compressão simples.

**Tabela 06:** Parâmetros de entrada para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira sob compressão simples.

| DESCRIÇÃO                                    | SIGLA A SER UTILIZADA PELO SOFTWARE | UNIDADE DE MEDIDA |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| <b>Características geométrica</b>            |                                     |                   |
| Largura                                      | L                                   | cm                |
| Comprimento                                  | C                                   | cm                |
| Altura                                       | H                                   | cm                |
| <b>Dados sobre o carregamento</b>            |                                     |                   |
| Carga permanente                             | Ng                                  | KN                |
| Carga variável                               | Nq                                  | KN                |
| Classe de carregamento                       | -                                   | Texto             |
| Coeficiente de majoração da carga permanente | -                                   | Adimensional      |
| Coeficiente de majoração da carga variável   | -                                   | Adimensional      |
| <b>Dados da madeira</b>                      |                                     |                   |
| Tipo de madeira                              | -                                   | Texto             |
| Classe de umidade                            | -                                   | Adimensional      |
| Classe de resistência                        | -                                   | Texto             |

**Fonte:** Autor, 2024.

### 3.3.2 Dimensionamento de vigas sob flexão simples em situação de incêndio

Retirados do Eurocódigo 5 (EN 1995-1-2), os parâmetros de entrada para os dois métodos abordados neste trabalho — seções reduzidas e propriedades reduzidas — incluem, além dos dados básicos sobre características geométricas e carregamentos, informações sobre taxas de carbonização virtual e unidimensional, carga de incêndio específica, oxigênio disponível, coeficiente de modificação  $K_{mod}$ , tempo de exposição ao incêndio e outros

detalhes especificados nas Tabelas 07 e 08 a seguir e necessários para a realização do dimensionamento em questão.

**Tabela 07:** Parâmetros de entrada para o dimensionamento de vigas sob flexão simples pelo método das seções reduzidas.

| DESCRIÇÃO                                  | SIGLA A SER UTILIZADA PELO SOFTWARE | UNIDADE DE MEDIDA |
|--------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Características geométrica                 |                                     |                   |
| Largura                                    | L                                   | cm                |
| Comprimento                                | C                                   | cm                |
| Altura                                     | H                                   | cm                |
| Dados sobre o carregamento                 |                                     |                   |
| Carga permanente                           | Ng                                  | KN                |
| Carga variável                             | Nq                                  | KN                |
| Resistência característica                 | fc                                  | KN/m²             |
| Coeficiente de modificação                 | Kmod                                | Adimensional      |
| Demais dados                               |                                     |                   |
| Taxa básica de carbonatação virtual        | -                                   | mm/min            |
| Taxa básica de carbonatação unidimensional | -                                   | mm/min            |
| Massa específica                           | -                                   | Kg/m³             |
| Tempo de incêndio                          | -                                   | min               |

Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 08:** Parâmetros de entrada para o dimensionamento de vigas sob flexão simples pelo método das propriedades reduzidas.

| DESCRIÇÃO                                    | SIGLA A SER UTILIZADA PELO SOFTWARE | UNIDADE DE MEDIDA                           |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Características geométrica e Oxigênio</b> |                                     |                                             |
| Largura                                      | L                                   | cm                                          |
| Comprimento                                  | C                                   | cm                                          |
| Altura                                       | H                                   | cm                                          |
| Oxigênio disponível                          | -                                   | m <sup>1/2</sup>                            |
| <b>Dados sobre o carregamento</b>            |                                     |                                             |
| Carga permanente                             | Ng                                  | KN                                          |
| Carga variável                               | Nq                                  | KN                                          |
| Resistência característica                   | fc                                  | KN/m <sup>2</sup>                           |
| Inércia térmica                              | -                                   | J/m <sup>2</sup> • (s <sup>1/2</sup> ) • °C |
| Carga de incêndio específica                 | -                                   | MJ/m <sup>2</sup>                           |
| <b>Demais dados</b>                          |                                     |                                             |
| Taxa básica de carbonatação virtual          | -                                   | mm/min                                      |
| Taxa básica de carbonatação unidimensional   | -                                   | mm/min                                      |
| Massa específica                             | -                                   | Kg/m <sup>3</sup>                           |
| Tempo de incêndio                            | -                                   | min                                         |

**Fonte:** Autor, 2024.

### 3.3.3 Dosagem de concreto convencional pelo método ABCP

No método da ABCP para dosagem de concreto convencional, são necessários os parâmetros definidos por Rodrigues (1998) e presentes na NBR 12655 (2022). Destacam-se: características dos agregados, como módulo de finura, massa unitária, umidade, massa específica e diâmetro, além das resistências do cimento e do concreto aos 28 dias, o abatimento obtido pelo teste de slump (referência) e a condição de mistura do concreto. A Tabela 09 a seguir detalha estes e os demais dados de entrada a serem utilizados.

**Tabela 09:** Parâmetros de entrada para a dosagem de concreto convencional pelo método da ABCP.

| DESCRIÇÃO                               | SIGLA A SER UTILIZADA PELO SOFTWARE | UNIDADE DE MEDIDA |
|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| <b>Dados da areia</b>                   |                                     |                   |
| Módulo de finura                        | -                                   | Adimensional      |
| Massa unitária                          | -                                   | Kg/m <sup>3</sup> |
| Umidade                                 | -                                   | %                 |
| Massa específica                        | -                                   | Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Dados do agregado graúdo (Brita)</b> |                                     |                   |
| Massa unitária                          | -                                   | Kg/m <sup>3</sup> |
| Diâmetro máximo da brita                | -                                   | mm                |
| Massa específica                        | -                                   | Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Dados do cimento</b>                 |                                     |                   |
| Resistência aos 28 dias                 | -                                   | MPa               |
| Massa específica                        | -                                   | Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Dados do concreto</b>                |                                     |                   |
| Classe/condição                         | -                                   | Texto             |
| Resistência aos 28 dias                 | -                                   | MPa               |
| Abatimento                              | -                                   | mm                |

**Fonte:** Autor, 2024.

### 3.3.4 Métodos numéricos

As rotas para os métodos numéricos exigem parâmetros de entrada para o cálculo da representação binária de números, funções e limites inferiores e superiores para integração numérica e cálculo de zeros de funções, matrizes de coeficientes e constantes para resolução de sistemas de equações complexas e coordenadas para ajuste polinomial. Os cálculos implementados para esta área são baseados nas técnicas apresentadas por Gilat (2008). A Tabela 10 a seguir ilustra os dados que serão solicitados pelo MecTool ao usuário para cada aba destinada a uma área do cálculo numérico.

**Tabela 10:** Parâmetros de entrada para métodos numéricos.

| DESCRIÇÃO                                                                            | SIGLA A SER UTILIZADA PELO SOFTWARE | UNIDADE DE MEDIDA |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| <b>Representação binária</b>                                                         |                                     |                   |
| Numero a ser representado/convertido                                                 | -                                   | Adimensional      |
| Número de bits do computador                                                         | -                                   | Adimensional      |
| <b>Zero da função pelos métodos da Bissecção, das Cordas, de Newton e da Secante</b> |                                     |                   |
| Função $f(x)$                                                                        | -                                   | Texto             |
| Limite inferior                                                                      | a                                   | Adimensional      |
| Limite superior                                                                      | b                                   | Adimensional      |
| Nº de iterações                                                                      | -                                   | Adimensional      |
| Tolerância                                                                           | -                                   | Adimensional      |
| <b>Resolução de sistemas de equações pelo método da eliminação gaussiana</b>         |                                     |                   |
| Matriz de coeficientes                                                               | -                                   | Texto             |
| Vetor das constantes                                                                 | -                                   | Texto             |
| <b>Resolução de sistemas de equações pelo método de Gauss Jacobi</b>                 |                                     |                   |
| Matriz de coeficientes                                                               | -                                   | Texto             |
| Vetor das constantes                                                                 | -                                   | Texto             |
| Nº de iterações                                                                      | -                                   | Adimensional      |
| <b>Ajuste polinomial</b>                                                             |                                     |                   |
| Coordenadas X                                                                        | -                                   | Texto             |
| Coordenadas y                                                                        | -                                   | Texto             |
| Grau do polinômio                                                                    | -                                   | Adimensional      |
| <b>Integração numérica pela regra do trapézio</b>                                    |                                     |                   |
| Coordenadas X                                                                        | -                                   | Texto             |
| Coordenadas y                                                                        | -                                   | Texto             |
| Limite inferior                                                                      | -                                   | Adimensional      |
| Limite superior                                                                      | -                                   | Adimensional      |
| Subintervalos                                                                        | -                                   | Adimensional      |

Fonte: Autor, 2024.

### 3.4 Desenvolvimento das novas funcionalidades: Caracterização da ferramenta

O desenvolvimento das novas atualizações do MecTool teve como linguagem de programação o Python, por meio de suas diversas bibliotecas tais com Tkinter, Numpy, Math, PIL, Matplotlib, Decimal, dentre outras. Por conseguinte, visando uma melhor integração entre a parte lógica e a interface, para cada área foi desenvolvido um pacote contendo os scripts com os códigos responsáveis pelos tratamentos dos dados de entrada, realização dos cálculos requisitados e retorno dos dados de saída.

#### 3.4.1 Elementos estruturais de madeira

O recebimento dos dados de entrada bem como o retorno dos resultados dos cálculos é realizado por meio das telas desenvolvidas para dimensionamento de vigas e pilares de madeira. A Figura 6 ilustra a primeira aba referente ao dimensionamento de pilares de madeira.

**Figura 6:** Aba de dados de entrada para dimensionamento de pilares de madeira.

**Fonte:** Autor, 2024.

As principais equações em que esses dados de entrada são utilizados são: verificação da esbeltez (equação 1), verificação da resistência à compressão (Equações 2 e 3) e verificação da estabilidade (Equação 4), todas extraídas da NBR 7190-1 (2022).

$$\lambda = \frac{L\sqrt{12}}{h} < 140 \quad \text{Eq. (1)}$$

$$\sigma N_{c,d} = \frac{\gamma_g \times N_g + \gamma_q \times N_q}{A_w} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$f_{c0d} = \frac{K_{mod1} \times K_{mod2} \times f_{cok}}{1,4} \geq \sigma N_{c,d} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\frac{\sigma N_{c,d}}{K_c \times f_{c0d}} \leq 1 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

|                                                                        |                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\lambda$                                                              | Esbeltez máxima;                                                                                                                                                                                              |
| $L$                                                                    | Comprimento de flambagem;                                                                                                                                                                                     |
| $h$                                                                    | Dimensão da seção relativa a esbeltez máxima;                                                                                                                                                                 |
| $\sigma N_{c,d}$                                                       | Tensão solicitante;                                                                                                                                                                                           |
| $f_{c0,d}$                                                             | Tensão resistente de compressão;                                                                                                                                                                              |
| $N_g$ e $N_q$                                                          | Cargas permanente e acidental, respectivamente;                                                                                                                                                               |
| $\gamma_g$ e $\gamma_q$                                                | Coeficientes de majoração das cargas permanentes e acidental, respectivamente;                                                                                                                                |
| $A_w$                                                                  | Área da seção transversal do pilar                                                                                                                                                                            |
| $K_{mod1}$ e $K_{mod2}$                                                | Coeficientes de modificação;                                                                                                                                                                                  |
| $f_{cok}$                                                              | Resistência característica;                                                                                                                                                                                   |
| $K_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}$                     | Fator de instabilidade;                                                                                                                                                                                       |
| $k = 0,5[1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2]$         |                                                                                                                                                                                                               |
| $\beta_c$                                                              | Fator para peças estruturais que atendam aos limites de divergência de alinhamento, variando entre 0,1 para lamelada (MLC e MLCC) e madeira laminada (LVL) e 0,2 para madeira maciça serrada e peças roliças; |
| $\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$ | Índice de esbeltez relativo;                                                                                                                                                                                  |

$$E_{0,05} = 0,7 \times E_{c0,med}$$

Módulo de elasticidade característico;

$$E_{c0,med}$$

Valor médio do módulo de elasticidade na compressão medido na direção paralela às fibras da madeira.

A figura 7 ilustra a aba dedicada ao dimensionamento de vigas de madeira. Da mesma forma, essa tela permite a interação entre usuário e sistema possibilitando a entrada e saída de dados.

**Figura 7:** Aba de dados de entrada para dimensionar de pilares de madeira.

Fonte: Autor, 2024.

Nesta rota, os parâmetros inseridos são utilizados, principalmente, pelas seguintes verificações: resistência a compressão (Equação 5), resistência a tração (Equação 6) e resistência ao cisalhamento (Equação 7).

$$f_{c0,d} \geq \sigma N_{c,dsup} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$f_{t0,d} \geq \sigma N_{c,dinf} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$f_{vd} \geq \tau_d \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

$f_{c0,d}$  Tensão resistente a compressão;

|                     |                                     |
|---------------------|-------------------------------------|
| $\sigma N_{c,dsup}$ | Tensão solicitante de compressão;   |
| $f_{t0,d}$          | Tensão resistente de tração;        |
| $\sigma N_{c,dinf}$ | Tensão solicitante de tração;       |
| $f_{vd}$            | Tensão resistente de cisalhamento;  |
| $\tau_d$            | Tensão solicitante de cisalhamento. |

Para mais detalhes sobre os procedimentos adotados nas verificações mencionadas deve-se consultar a NBR 7190 (2022).

Já a rota para o dimensionamento de vigas em situação de incêndio sob flexão simples é acessada por meio da tela apresentada na figura 8, a qual ilustra os campos de entrada e o prompt de saída para o método das seções reduzidas.

**Figura 8:** Aba de dados de entrada e saída para dimensionamento de vigas em situação de incêndio pelo método das seções reduzidas.

The screenshot shows the 'MecTool' application window. The title bar includes 'MecTool' and standard window controls. The menu bar has 'Voltar'. The tab bar shows 'Pilar', 'Viga', 'V. Incêndio Sec. Red.', and 'V. Incêndio Prop. Red.'. The main window title is 'Dimensionamento de vigas sob flexão simples em situação de incêndio pelo método das seções reduzidas (Eurocódigo 5)'. The 'Dados de entrada' section is divided into three columns: 'Características geométricas' (Largura L (cm), Comprimento C (cm), Altura H (cm)), 'Dados sobre os carregamentos' (Carga permanente Ng (KN/m), Carga variável Nq (KN/m), Resistência Característica (KN/m²), Coeficiente de modificação Kmod), and 'Demais dados' (Taxa básica de carbonização virtual (mm/min), Taxa de carbonização unidimensional (mm/min), Massa específica (Kg/m³), Tempo de incêndio (min)). A green 'Calcular' button is below the input fields. The 'Resultados' section shows a diagram of a beam with dimensions L, C, and H, and a label 'Nk = Ng + Nq'.

**Fonte:** Autor, 2024.

Para obter um entendimento completo sobre os procedimentos adotados no cálculo dos parâmetros de saída, bem como as etapas detalhadas que devem ser seguidas durante as verificações necessárias, tanto para o método das seções reduzidas quanto para o método das propriedades reduzidas, é altamente recomendável que se consulte o Eurocódigo 5. Este documento normativo fornece diretrizes abrangentes e normas técnicas que são essenciais para garantir a precisão e conformidade dos cálculos e verificações realizados.

### 3.4.2 Dosagem de concreto convencional pelo método ABCP

O sistema recebe os parâmetros de entrada para a realização dos cálculos da dosagem do concreto por meio da interface ilustrada na Figura 9.

**Figura 9:** Aba de dados de entrada e saída para dosagem de concreto convencional.

The interface is titled "Traço de concreto convencional". It features a "Voltar" button at the top left. The main area is divided into sections for input data:

- Dados de entrada:**
  - Dados da areia:** Módulo de finura, Massa unitária (kg/m³), Umidade (%), Massa específica (kg/m³).
  - Dados do agregado graúdo (Brita):** Massa unitária (kg/m³), Diâmetro máximo da brita (mm), Massa específica (kg/m³).
  - Dados do cimento:** Resistência aos 28 dias (MPa) (dropdown), Massa específica (kg/m³).
  - Dados do concreto:** Classe/condição (dropdown), Resistência aos 28 dias (MPa), Abatimento (mm).
  - Dimensões da padiola:** Largura (cm), Comprimento (cm), Altura (cm).

A green "Calcular" button is located below the input fields. The results section, titled "Resultados", displays:

- Traço médio:** 1: (input field).
- Traço para um saco de cimento de 50kg:**
  - \*Dimensões da padiola: (input field)
  - Brita: (input field)
  - Areia: (input field)
  - Água: (input field)

**Fonte:** Autor, 2024.

Nos espaços destinados a inserção de dados devem ser preenchidas as informações relativas as características da areia, do agregado graúdo, do cimento, do concreto e até as dimensões da padiola. O processamento desses dados pelo sistema se deu principalmente pela Equação 8 utilizada para o cálculo do fator água/cimento e conhecida como Lei de Abrams.

$$f_{cmj} = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad \text{Eq. (8)}$$

#### 3.4.2.1 Fator água/cimento

Para a obtenção do fator água/cimento faz-se necessário o cálculo prévio da resistência média de dosagem do concreto ( $f_{cmj}$ ) que deve ser utilizado para fins de dosagem. A NBR 12655/22 indica que quando a quantidade de dias  $j$  não for expresso deve-se adotar uma

quantidade de 28 dias. A mesma norma recomenda ainda a utilização da seguinte Equação 9 para que este indicativo seja encontrado.

$$f_{cm28} = f_{ck28} + 1,65 \times Sd \quad \text{Eq. (9)}$$

Em que:

|            |                                                                                                                |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $f_{cm28}$ | Resistência média de dosagem do concreto aos 28 dias;                                                          |
| $f_{ck28}$ | Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias;                                               |
| $Sd$       | Desvio-padrão de dosagem em definido pela NBR 12655/22 segundo a condição de preparo, como mostra o Quadro 02. |

**Quadro 02:** Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto.

| Condição de preparo do concreto | Desvio-padrão MPa |
|---------------------------------|-------------------|
| A                               | 4,0               |
| B                               | 5,5               |
| C                               | 7,0               |

**Fonte:** Modificado da NBR 12655, 2022.

Obtida a informação da resistência de dosagem, aplica-se a mesma na Equação da Lei de Abrams (Equação 8) e isola-se o fator  $a/c$  em uma linearização da expressão por meio de propriedades dos logaritmos, obtendo-se a Equação 10 abaixo.

$$\begin{aligned}
 f_{cm28} &= \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \\
 \log(f_{cm28}) &= \log\left(\frac{K_1}{K_2^{a/c}}\right) \\
 \log(f_{cm28}) &= \log(K_1) - \log(K_2^{a/c}) \\
 \log(f_{cm28}) &= \log(K_1) - a/c \times \log(K_2) \\
 \frac{a}{c} &= \frac{\log(K_1) - \log(f_{cm28})}{\log(K_2)} \quad \text{Eq. (10)}
 \end{aligned}$$

A partir das curvas obtidas experimentalmente para vários tipos de cimento por Rodrigues (1998), podemos encontrar seus respectivos valores de  $K_1$  e  $K_2$ . As diversas

classes de cimentos diferem umas das outras por meio da variação de sua resistência normal do cimento aos 28 dias  $fr_{28}$ .

A obtenção dessas constantes contou com o auxílio de uma série de ajustes não lineares dessas curvas realizados por meio da linguagem de programação R. Esses ajustes foram baseados em uma série de coordenadas ( $x$ ,  $y$ ) aferidas visualmente do gráfico da Figura 02 e apresentados na Tabela 11. O termo  $x$  de cada ponto refere-se ao fator água/cimento ( $a/c$ ) atrelado a resistência  $f_{cm28}$ , termo  $y$ , para vários tipos de cimento.

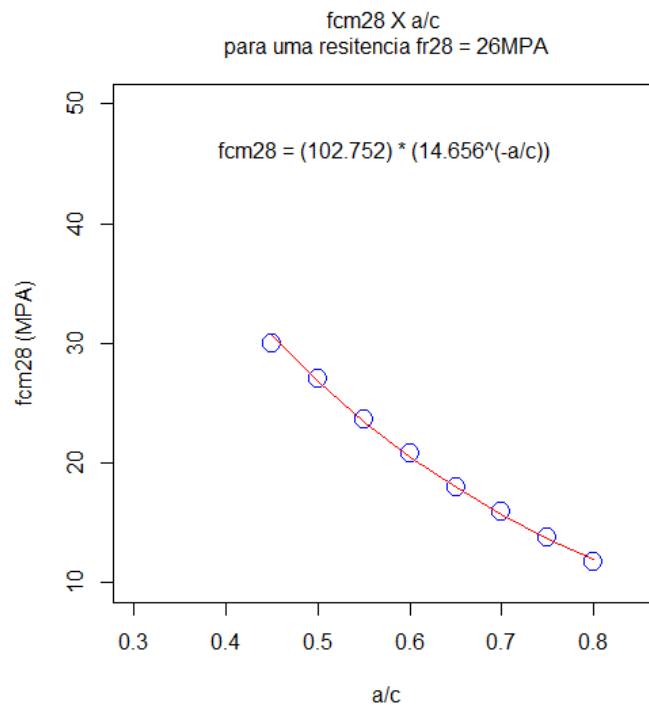
**Tabela 11:** Coordenadas para os ajustes.

| Coordenadas para $fr_{28} = 26$ MPa |       | Coordenadas para $fr_{28} = 29$ MPa |       | Coordenadas para $fr_{28} = 32$ MPa |       |
|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
| x                                   | y     | x                                   | y     | x                                   | y     |
| 0,45                                | 30,00 | 0,45                                | 33,20 | 0,45                                | 36,50 |
| 0,50                                | 27,00 | 0,50                                | 29,50 | 0,50                                | 32,00 |
| 0,55                                | 23,60 | 0,55                                | 25,80 | 0,55                                | 28,00 |
| 0,60                                | 20,80 | 0,60                                | 22,80 | 0,60                                | 24,80 |
| 0,65                                | 18,00 | 0,65                                | 19,80 | 0,65                                | 21,50 |
| 0,70                                | 15,90 | 0,70                                | 17,20 | 0,70                                | 18,90 |
| 0,75                                | 13,80 | 0,75                                | 14,90 | 0,75                                | 16,30 |
| 0,80                                | 11,70 | 0,80                                | 12,80 | 0,80                                | 14,00 |
| Coordenadas para $fr_{28} = 35$ MPa |       | Coordenadas para $fr_{28} = 38$ MPa |       | Coordenadas para $fr_{28} = 41$ MPa |       |
| x                                   | y     | x                                   | y     | x                                   | y     |
| 0,45                                | 39,10 | 0,45                                | 42,90 | 0,45                                | 45,50 |
| 0,50                                | 34,50 | 0,50                                | 37,50 | 0,50                                | 40,00 |
| 0,55                                | 30,20 | 0,55                                | 32,40 | 0,55                                | 34,90 |
| 0,60                                | 26,50 | 0,60                                | 28,60 | 0,60                                | 30,50 |
| 0,65                                | 23,30 | 0,65                                | 24,90 | 0,65                                | 26,50 |
| 0,70                                | 20,10 | 0,70                                | 21,80 | 0,70                                | 23,20 |
| 0,75                                | 17,40 | 0,75                                | 18,90 | 0,75                                | 20,30 |
| 0,80                                | 15,00 | 0,80                                | 16,10 | 0,80                                | 17,50 |
| Coordenadas para $fr_{28} = 44$ MPa |       |                                     |       |                                     |       |
| x                                   | y     |                                     |       |                                     |       |
| 0,45                                | 48,00 |                                     |       |                                     |       |
| 0,50                                | 42,90 |                                     |       |                                     |       |
| 0,55                                | 37,20 |                                     |       |                                     |       |
| 0,60                                | 32,50 |                                     |       |                                     |       |
| 0,65                                | 28,30 |                                     |       |                                     |       |
| 0,70                                | 25,00 |                                     |       |                                     |       |
| 0,75                                | 21,80 |                                     |       |                                     |       |
| 0,80                                | 18,50 |                                     |       |                                     |       |

**Fonte:** Autor, 2024.

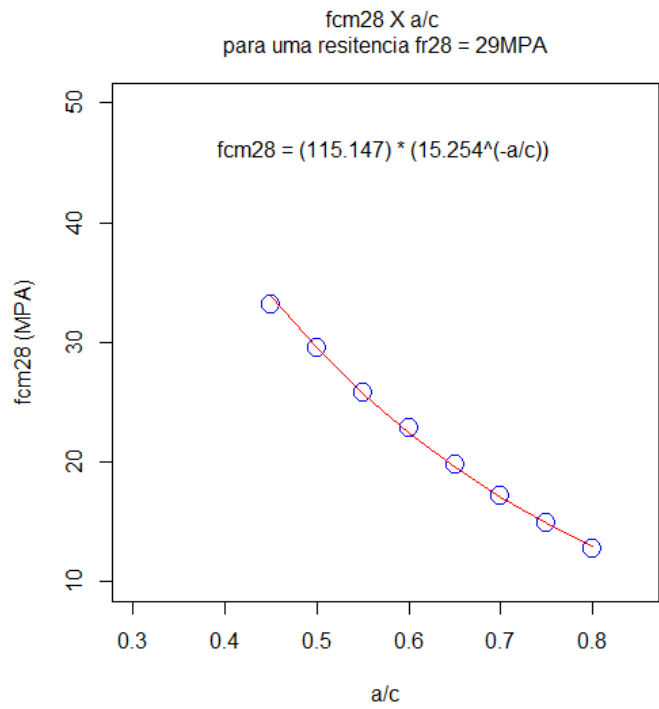
Os ajustes, realizados com o auxílio do bloco de código mostrado no apêndice A, podem ser observados nas Figuras 10 a 16. Os dados das constantes  $K_1$  e  $K_2$  estão resumidos na tabela 12.

**Figura 10:** Ajuste 01.



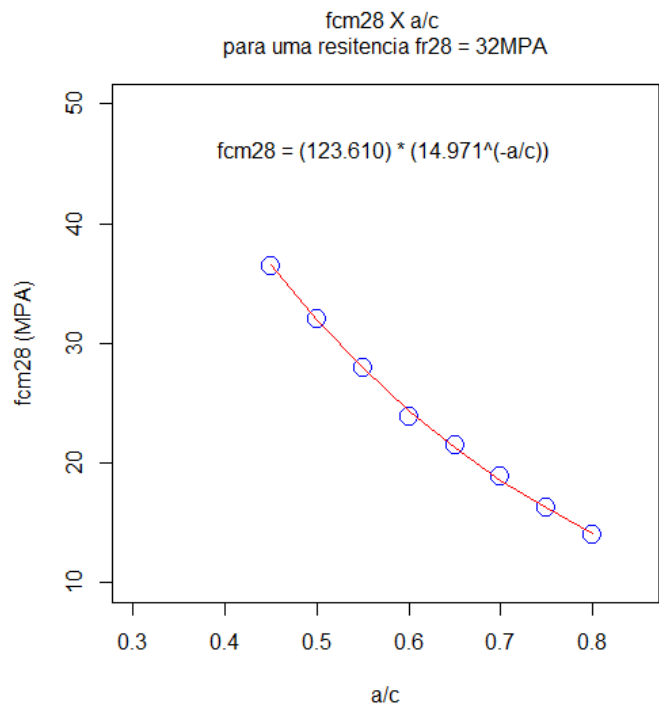
**Fonte:** Autor, 2024.

Figura 11: Ajuste 02.



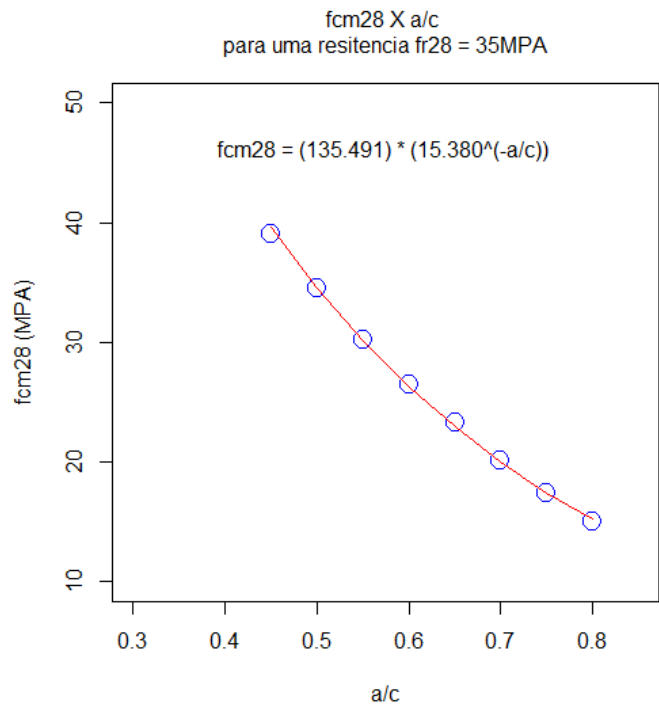
Fonte: Autor, 2024.

Figura 12: Ajuste 03.



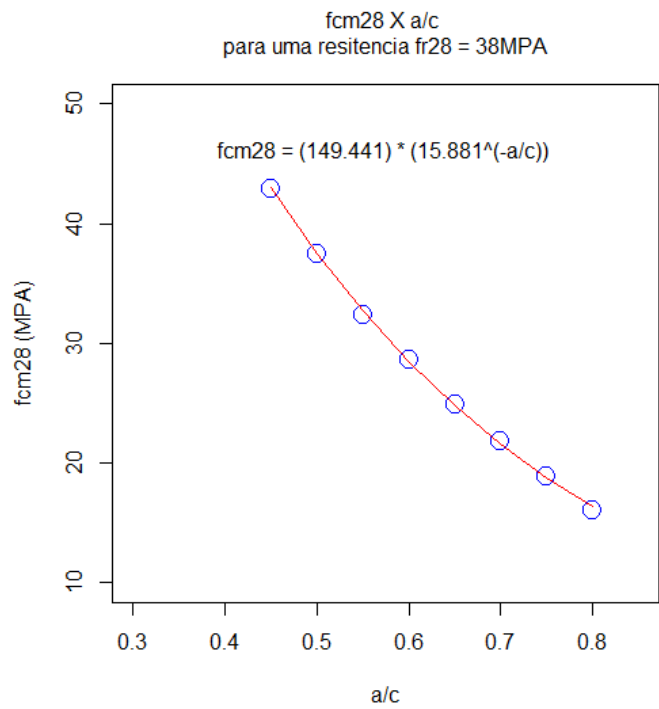
Fonte: Autor, 2024.

Figura 13: Ajuste 04.



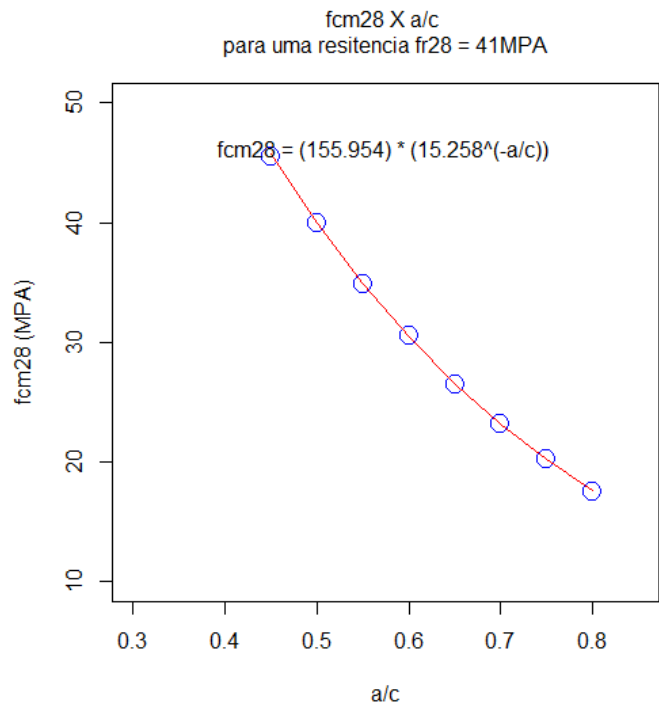
Fonte: Autor, 2024.

Figura 14: Ajuste 05.



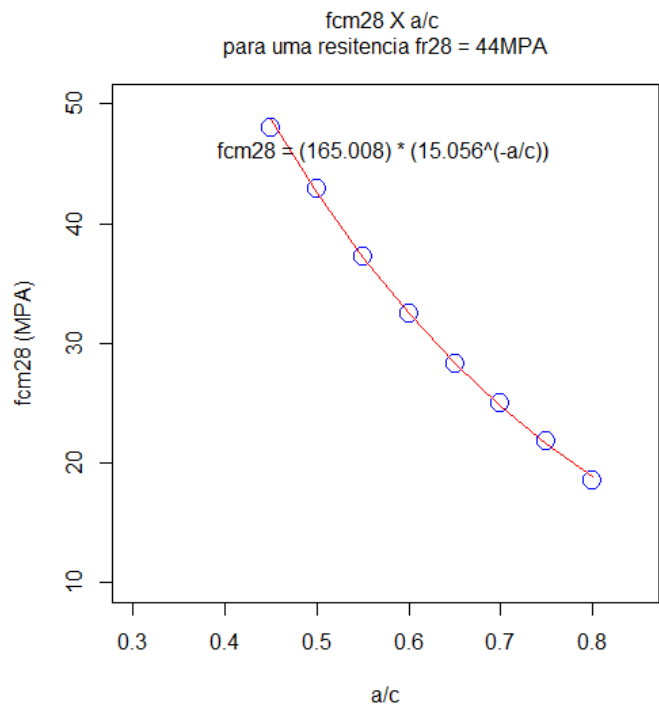
Fonte: Autor, 2024.

Figura 15: Ajuste 06.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 16: Ajuste 07.



Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 12:** Constantes K1 e K2 para cada tipo de cimento.

| <b>fr28 (MPa)</b> | <b>K1</b> | <b>K2</b> |
|-------------------|-----------|-----------|
| 26                | 102,7520  | 14,6560   |
| 29                | 115,1470  | 15,2540   |
| 32                | 123,6097  | 14,9710   |
| 35                | 135,4910  | 15,3800   |
| 38                | 149,4405  | 15,8810   |
| 41                | 155,9540  | 15,2580   |
| 44                | 165,0080  | 15,0560   |

**Fonte:** Autor, 2024.

O armazenamento desta e de outras tabelas utilizadas nos cálculos são armazenadas em matrizes pelo sistema e resgatada quando solicitada por alguma rota para o cálculo do fator a/c com o auxílio da equação 10.

#### 3.4.2.2 Determinação do Consumo de água (Ca)

Com os dados do abatimento Ab coletados, o consumo de água Ca pode ser mensurado com o auxílio da Tabela 13 a seguir desenvolvida por Rodrigues (1998) em seu Estudo Técnico.

**Tabela 13:** Consumo aproximado de água.

| <b>Abatimento<br/>(mm)</b> | <b>Dimensão máxima característica do<br/>agregado graúdo (mm)</b> |             |             |             |             |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                            | <b>9,5</b>                                                        | <b>19,0</b> | <b>25,0</b> | <b>32,0</b> | <b>38,0</b> |
| <b>40 a 60</b>             | 220                                                               | 195         | 190         | 185         | 180         |
| <b>60 a 80</b>             | 225                                                               | 200         | 195         | 190         | 185         |
| <b>80 a 100</b>            | 230                                                               | 205         | 200         | 195         | 190         |

**Fonte:** Modificado do trabalho de Rodrigues, 1998.

Para efeitos de cálculos envolvendo valores intermediários para a dimensão máxima do agregado graúdo, o software fará o emprego de interpolação linear com o auxílio da Equação 11.

$$y = y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \times (y_1 - y_0) \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde os termos  $y$  representam o consumo de água e os termos  $x$  as dimensões máximas características do agregado graúdo.

### 3.4.2.3 Determinação do consumo de cimento $C_c$

Essa medida será aferida pelo MecTool com o auxílio da Equação 12 derivada do Estudo Técnico de Rodrigues (1998), onde todas as incógnitas foram definidas nas seções anteriores.

$$C_c = \frac{Ca}{a/c} \quad \text{Eq. (12)}$$

### 3.4.2.4 Determinação do consumo de brita (agregado graúdo) $C_b$

O valor do consumo de brita  $C_b$ , pode ser obtido pela multiplicação da massa unitária compactada  $M_{Ub}$  pelo seu volume compactado  $V_c$ . O valor de  $V_c$  pode ser obtido pela Tabela 13 desenvolvida por Rodrigues (1998). Essa tabela relaciona o diâmetro máximo do agregado graúdo ( $D_{max}$ ) com o módulo de finura da areia (MF) para obter o valor de  $V_c$  em  $m^3$ .

**Tabela 14:** Volume de agregado graúdo compactado por  $m^3$  de concreto.

| <b>Dmax</b> |              |             |             |             |             |
|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>MF</b>   | <b>9,5mm</b> | <b>19mm</b> | <b>25mm</b> | <b>32mm</b> | <b>38mm</b> |
| <b>1,8</b>  | 0,645        | 0,77        | 0,795       | 0,82        | 0,845       |
| <b>2</b>    | 0,625        | 0,75        | 0,775       | 0,8         | 0,825       |
| <b>2,2</b>  | 0,605        | 0,73        | 0,755       | 0,78        | 0,805       |
| <b>2,4</b>  | 0,585        | 0,71        | 0,735       | 0,76        | 0,785       |
| <b>2,6</b>  | 0,565        | 0,69        | 0,715       | 0,74        | 0,765       |
| <b>2,8</b>  | 0,545        | 0,67        | 0,695       | 0,72        | 0,745       |
| <b>3</b>    | 0,525        | 0,65        | 0,675       | 0,7         | 0,725       |
| <b>3,2</b>  | 0,505        | 0,63        | 0,655       | 0,68        | 0,705       |
| <b>3,4</b>  | 0,485        | 0,61        | 0,635       | 0,66        | 0,685       |
| <b>3,6</b>  | 0,465        | 0,59        | 0,615       | 0,64        | 0,665       |

**Fonte:** Modificado do trabalho de Rodrigues, 1998.

Novamente, para efeito de cálculos envolvendo valores intermediários de  $D_{max}$ , fazemos o uso de uma interpolação linear com o auxílio da Equação 11 para permitir encontrar um valor de  $V_c$  mais preciso. Nesse caso os termos  $y$  da Equação 11 representam o parâmetro  $V_c$ . A partir do valor obtido substitui-se na Equação 13 para a determinação do consumo de brita. Essa equação é processada pelo programa assim que receber o valor aproximado de  $V_c$ .

$$C_b = V_c \times M_{Ub} \quad \text{Eq. (13)}$$

#### 3.4.2.5 Determinação do consumo de areia $C_m$

Segundo Rodrigues (1998), o volume absoluto de areia  $V_m$  a ser utilizada deve ser obtido através da diferença entre a soma dos valores absolutos dos demais fatores em relação a  $1\text{m}^3$  de concreto. Dessa forma, o cálculo é realizado através da Equação 14.

$$V_m = 1 - \left[ \frac{C_c}{M_{Ec}} + \frac{C_b}{M_{Eb}} + \frac{C_a}{M_{Ea}} \right] \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde o termo  $M_{Ea}$  representa a massa específica da água conhecida como sendo aproximadamente  $1000\text{kg/m}^3$ .

O consumo de areia é então determinado pela multiplicação do termo  $V_m$  pela massa específica  $M_{Em}$  da areia como mostra a Equação 15.

$$C_m = V_m \times M_{Em} \quad \text{Eq. (15)}$$

#### 3.4.2.6 Apresentação do traço médio e traço de obra

O traço médio unitário refere-se à relação das porções de cada constituinte para uma porção cimento e o traço de obra pode ser definido como as porções em kg de cada constituinte para um saco de cimento de 50kg, ambos são definidos a seguir.

$$\text{Traço médio: } (C_c : C_m : C_b : C_a)/C_c \Rightarrow 1 : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c}$$

$$\text{Traço de obra: } (\text{Traço médio}) \times 50\text{kg}$$

Além das massas, é possível ainda determinar os volumes de cada constituinte com o fim de estimar a quantidade de padiolas de dimensões  $l \times h \times c$ . O volume de cada item pode ser obtido pela seguinte expressão genérica:

$$\text{Volume} = \frac{\text{Massa}}{\text{Massa específica}} \quad \text{Eq. (16)}$$

Com a informação do volume, o software consegue estimar a quantidade de padiolas para os agregados (gráúdo e miúdo) de acordo com as dimensões do deste recipiente.

O quantitativo de água a ser adicionado dependerá da umidade que já se encontra a areia anteriormente a mistura. Portanto o volume de água adicionada deve partir da diferença entre o consumo de água em litros dado pelo traço unitário e a água presente na areia. O cálculo da porção de água presente na areia  $V_{wm}$  é dado pela Equação 17 e a Equação 18 determina o volume que deve ser adicionado ao traço  $V_{wa}$ .

$$V_{wm} = \frac{\text{Massa da areia}}{\text{Umidade da areia}} \times 100 \quad \text{Eq. (17)}$$

$$V_{wa} = \frac{Ca}{Cc} - V_{wm} \quad \text{Eq. (18)}$$

Assim, o programa calculará o consumo de água de acordo com a umidade já presente no agregado miúdo antes da realização da dosagem.

### 3.4.3 Métodos numéricos

Para os métodos numéricos, a interface gráfica conta com uma série de abas destinadas a inserção dos inúmeros dados de entrada destinados a realização dos seguintes cálculos: representação binária; zero de funções pelos métodos da bisseção, cordas, newton e secante; resolução de sistemas de equações pelos métodos da eliminação Gaussiana e de Gauss Jacobi; ajuste polinomial; integração numérica pelos métodos do trapézio e de simpson. Devido a grande quantidade de abas, as mesmas são ilustradas no apêndice B, para mais detalhes as referências podem ser consultadas.

Dentre as várias equações empregadas no processamento dos dados de entrada, a

Equação 19 se destaca por definir os cálculos de integração numérica utilizando a regra de Simpson.

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)] \quad \text{Eq. (19)}$$

Para mais detalhes sobre todas as equações e procedimentos utilizados verificar a bibliografia referenciada tais como Gilat (2008) e Aguiar e Silva (2010).

### 3.5 Validação da ferramenta

A precisão da segunda versão do MecTool, desenvolvida neste trabalho, foi validada por meio da aplicação da ferramenta computacional em problemas da literatura, produzindo resultados compatíveis com os encontrados nesses estudos. Além disso, também utilizou-se softwares desenvolvidos por outros autores na resolução dos mesmos problemas obtidos na literatura, visando comparar os valores retornados com os do MecTool.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Elementos estruturais de madeira

Inicialmente, a tela destinada ao dimensionamento de pilares de madeira apresenta a resolução de um problema proposto por Oliveira (2023). O autor fornece uma análise teórica detalhada e a solução computacional obtida utilizando o software desenvolvido pelo mesmo. Os dados de entrada, bem como a solução realizada pelo Mectool, encontram-se ilustrados na Figura 19.

Figura 17: Aba de dados de entrada e saída para dimensionamento de pilares de madeira.

MecTool

Volitar

PilarViga

Verificação de pilares comprimidos segundo a NBR 7190/2022

Dados de entrada

Características geométricas

Largura L (cm)

20

Comprimento C (cm)

20

Altura H (cm)

400

Dados sobre os carregamentos

Carga permanente Ng (KN)

204.859

Carga variável Nq (KN)

0

Classe de carregamento

Longa duração

Coef. de majoração da carga Ng

1

Coef. de majoração da carga Nq

1

Dados da madeira

Tipo de madeira

Madeira serrada,  
Madeira roliça,  
Madeira lamelada colada (MLC),  
Madeira lamelada colada cruzada (MLCC),  
Madeira laminada colada (LVL).

Classe de umidade

3 - (75 % < Uamb ≤ 85 %)

Classe de resistência

C30 - Plantada

Calcular

Resultados

Nk = Ng + Nq

H (cm):

400

C (cm):

20

L (cm):

20

As (cm²):

400.00

λmax:

69.28

fc0d (KN/cm²):

0.92

σNcd (KN/cm²):

0.51

Kc:

0.56

H

L

C

VERIFICAÇÃO 1: Dimensões da seção

Critério 1: O menor lado da seção deve ser maior que 5cm.

Atende!

Critério 2: A área da seção de ser maior que 50cm².

Atende!

VERIFICAÇÃO 2: Esbeltez

Critério 1: A maior esbeltez λmax deve ser menor que 140.

Atende!

VERIFICAÇÃO 3: Resistência à compressão.

Critério 1: A tensão resistente fc0d de ve ser maior que a solicitante σNcd.

Atende!

VERIFICAÇÃO 4: Estabilidade.

Critério 1: A resistencia à flambagem Kc.fc0d deve ser maior que a tensão solicitante σNcd.

Atende!

Fonte: Autor, 2024.

O programa induz a uma tensão resistente máxima de 204.859KN. Esse resultado está em conformidade com os apresentados por Oliveira (2023), como é observado na Tabela 17 a seguir.

Tabela 15: Comparação entre valores obtidos por outros softwares e autores e pelo MecTool para um pilar de madeira.

| Tabela de testes |                                                                                                              |                             |          |          |                     |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------|----------|---------------------|
| Autor            | Problema                                                                                                     | Método                      | Solução  |          | Erro percentual (%) |
|                  |                                                                                                              |                             | Autor    | MecTool  |                     |
| Oliveira (2022)  | Calcular a resistência à compressão de um pilar de madeira serrada de segunda categoria, conífera, de classe | Solução teórica             | 205,0000 | 204,8590 | 0,0700              |
|                  |                                                                                                              | Com o auxílio da ferramenta | 204,8590 | 204,8590 | 0,0000              |

|  |                                                                                                                                                          |                          |  |  |  |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--|--|--|
|  | C30, com seção 20 x 20 cm e altura de 4 metros. Deve-se considerar a classe de umidade 3, floresta de madeiras plantadas e carregamento de longa duração | desenvolvida pela autora |  |  |  |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--|--|--|

**Fonte:** Autor, 2024.

O dimensionamento das vigas em situação de incêndio foi validado com base no exemplo 7.4.2 da revisão bibliográfica de Moraes (2015), resolvido de forma analítica. A Figura 16 apresenta os dados de entrada e os resultados gerados pelo MecTool. O software confirma que a viga suporta o tempo de exposição ao incêndio fornecido, corroborando o resultado obtido pelo autor supracitado.

**Figura 18:** Aba de dados de entrada e saída para dimensionamento de vigas de madeira em situação de incêndio.

**Dimencionamento de vigas sob flexão simples em situação de incêndio segundo o Eurocódigo 5**

**Dados de entrada**

| Características geométricas |     | Dados sobre os carregamentos       |           | Demais dados                                 |      |
|-----------------------------|-----|------------------------------------|-----------|----------------------------------------------|------|
| Largura L (cm)              | 8   | Carga permanente Ng (kN/m)         | 0.873     | Taxa básica de carbonização virtual (mm/min) | 0.7  |
| Comprimento C (cm)          | 300 | Carga variável Nq (kN/m)           | 2.34      | Taxa de carbonização unidimensional (mm/min) | 0.65 |
| Altura H (cm)               | 16  | Resistência Característica (kN/m²) | 25054.428 | Massa específica (kg/m³)                     | 370  |
|                             |     | Coefficiente de modificação Kmod   | 1         | Tempo de incêndio (min)                      | 15   |

**Calcular**

**Resultados**

$N_k = N_g + N_q$

Diagrama de uma viga de madeira com largura L, comprimento C e altura H.

|                                                                         |                   |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE VIGAS SEM PROTEÇÃO TÉRMICA - Flexão simples |                   |
| MÉTODO DAS SEÇÕES REDUZIDAS CONSIDERANDO O INCÊNDIO PADRÃO Eurocódigo 5 |                   |
| Momento Resistente de Cálculo considerando um tempo t de incêndio [N.m] | 4658.741194049851 |
| Momento Solicitante de Cálculo para a situação de incêndio [N.m]        | 4337.55           |
| A viga suporta o tempo de incêndio t especificado                       |                   |

Fonte: Autor, 2024

Na interface do MecTool, foram inseridos os seguintes dados de entrada para o dimensionamento da viga de madeira em situação de incêndio: características geométricas, com largura (L) de 8 cm, comprimento (C) de 300 cm e altura (H) de 16 cm; dados sobre os carregamentos, incluindo carga permanente (Ng) de 0,873 kN/m, carga variável (Nk) de 2,34 kN/m, resistência característica de 25054,428 kN/m² e coeficiente de modificação (Kmod) de 1; e demais dados, como taxa básica de carbonização virtual de 0,7 mm/min, taxa de carbonização unidimensional de 0,65 mm/min, massa específica de 370 kg/m³ e tempo de incêndio de 15 minutos. Após a análise, o MecTool apresentou um momento resistente de cálculo de 4668,711149049851 N.m e um momento solicitante de cálculo para a situação de incêndio de 4337,55 N.m, indicando que a viga suporta o tempo de incêndio especificado e validando o dimensionamento realizado.

## 4.2 Dosagem de concreto convencional pelo método ABCP

Na tela dedicada à dosagem de concreto convencional, são apresentados dois problemas. O primeiro, proposto por Aguiar e Silva (2023), e o segundo, por Euzébio e Pereira. (2021). Ambos os problemas foram implementados nos respectivos softwares desenvolvidos pelos autores. As Figuras 17 e 18 mostram os valores de entrada e saída processados pelo MecTool para o primeiro e o segundo problema, respectivamente.

Figura 19: Aba de dados de entrada e saída para dosagem de concreto convencional para o problema de Aguiar e Silva (2023).

MecTool

Voltar

Traço de concreto convencional

Dados de entrada

Dados da areia

Módulo de finura

2.99

Massa unitária (kg/m³)

1478.98

Umidade (%)

0

Massa específica (kg/m³)

2650

Dados do agregado graúdo (Brita)

Massa unitária (kg/m³)

1492.59

Diâmetro máximo da brita (mm)

19

Massa específica (kg/m³)

2839.58

Dados do cimento

Resistência aos 28 dias (MPa)

32

Massa específica (kg/m³)

3000

Dados do concreto

Classe/condição

A (sd=4)

Resistência aos 28 dias (MPa)

20

Abatimento (mm)

100

Dimensões da padiala

Largura (cm)

20

Comprimento (cm)

20

Altura (cm)

40

Calcular

Resultados

Traço médio

Traço médio 1 : 2.457 : 2.698 : 0.570

Traço para um saco de cimento de 50kg

\*Dimensões da padiala:

\*Padiala: 20 X 20 X 40cm

Brita:

6 padialas com h = 37.7 cm

Areia:

6 padialas com h = 34.6 cm

Água:

28.50 litros

Fonte: Autor, 2024.

Figura 20: Aba de dados de entrada e saída para dosagem de concreto convencional para o problema de Euzébio e Pereira (2021).

MecTool

Voltar

Traço de concreto convencional

Dados de entrada

Dados da areia

Módulo de finura

2.6

Massa unitária (kg/m³)

1470

Umidade (%)

0

Massa específica (kg/m³)

2650

Dados do agregado graúdo (Brita)

Massa unitária (kg/m³)

1500

Diâmetro máximo da brita (mm)

25

Massa específica (kg/m³)

2700

Dados do cimento

Resistência aos 28 dias (MPa)

32

Massa específica (kg/m³)

3100

Dados do concreto

Classe/condição

B (sd=5.5)

Resistência aos 28 dias (MPa)

25

Abatimento (mm)

100

Dimensões da padiala

Largura (cm)

20

Comprimento (cm)

20

Altura (cm)

40

Calcular

Resultados

Traço médio

Traço médio 1 : 1.707 : 2.574 : 0.480

Traço para um saco de cimento de 50kg

\*Dimensões da padiala:

\*Padiala: 20 X 20 X 40cm

Brita:

6 padialas com h = 35.7 cm

Areia:

4 padialas com h = 36.3 cm

Água:

24.00 litros

Fonte: Autor, 2024.

Dessa forma, é possível verificar o traço de concreto calculado pelo MecTool e comparar esses valores com os obtidos pelos autores mencionados, conforme ilustrado na Tabela 16 a seguir.

**Tabela 16:** Comparativo entre valores obtidos por outros softwares e autores e pelo MecTool para dosagem de concreto convencional.

| Tabela de testes         |                                                   |                                                                   |                           |                           |                     |
|--------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|
| Autor                    | Problema                                          | Método                                                            | Solução                   |                           | Erro percentual (%) |
|                          |                                                   |                                                                   | Autor                     | MecTool                   |                     |
| Aguiar e Silva (2023)    | Dosagem de concreto convencional pelo método ABCP | Realizada com o auxílio da ferramenta desenvolvida pelos autores. | 1 : 2.799 : 2.866 : 0.605 | 1 : 2.457 : 2.698 : 0.570 | 5,9638              |
| Euzébio e Pereira (2021) | Dosagem de concreto convencional pelo método ABCP | Realizada com o auxílio da ferramenta desenvolvida pelos autores. | 1 : 1.686 : 2.546 : 0.475 | 1 : 1.707 : 2.574 : 0.480 | 0,8475              |

**Fonte:** Autor, 2024.

À resolução dos problemas obtidos da literatura, obteve-se um erro relativo percentual de 5,97% e 0,85%. O maior erro relativo decorre a discrepância e inexactidão dos resultados calculados pela ferramenta de Aguiar e Silva (2023), como destacado pelos próprios autores. Ainda, os erros podem ser oriundos dos dados obtidos via gráficos da NBR 12655 (2022), assim como também podem ser devidos ao arredondamento e truncamento. Todavia, a precisão da ferramenta para rota relativa a área de materiais de construção encontra-se aceitável.

### 4.3 Métodos numéricos

Nas rotas voltadas para os métodos numéricos, foi aplicado uma série de problemas propostos por Gilat (2008). A Tabela 15 apresenta os valores teóricos e os retornados pelo MecTol para cada caso. No Apêndice B podem ser verificadas as imagens com os dados de entrada e saída.

**Tabela 17:** Comparativo entre resultados obtidos no MecTool com a literatura para problemas de Cálculo Numérico. (*continua*)

| Tabela de testes |                                                       |                          |                                                              |                                                              |                           |
|------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Autor            | Problema /<br>Parâmetro<br>analisado                  | Método                   | Solução                                                      |                                                              | Erro<br>percentual<br>(%) |
|                  |                                                       |                          | Autor                                                        | MecTool                                                      |                           |
| Gilat<br>(2008)  | Exemplo da<br>página 28 /<br>Representação<br>binária | Representação<br>binária | 010000000011<br>01101000...                                  | 010000000011<br>01101000...                                  | 0,0000                    |
| Gilat<br>(2008)  | Exemplo 3.1 /<br>Zero da função                       | Método da<br>bisseção    | 2,4307                                                       | 2,4307                                                       | 0,0000                    |
| Gilat<br>(2008)  | Exemplo 4.1 /<br>Solução de<br>sistema de<br>equação  | Eliminação de<br>Gauss   | x1 = 2,0000;<br>x2 = 4,0000;<br>x3 = -3,0000;<br>x4 = 0,5000 | x1 = 2,0000;<br>x2 = 4,0000;<br>x3 = -3,0000;<br>x4 = 0,5000 | 0,0000                    |
| Gilat<br>(2008)  | Exemplo 3.2 /<br>Zero da função                       | Método de<br>newton      | 2,4310                                                       | 2,4310                                                       | 0,0000                    |
| Gilat<br>(2008)  | Exemplo da<br>página 91 / Zero<br>da função           | Método da<br>secante     | 1,5050                                                       | 1,5050                                                       | 0,0000                    |

**Fonte:** Autor, 2024.

**Tabela 18:** Comparativo entre resultados obtidos no MecTool com a literatura para problemas de Cálculo Numérico. (continuação)

| Tabela de testes            |                                                                              |                                        |                               |                               |                           |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Autor                       | Problema /<br>Parâmetro<br>analisado                                         | Método                                 | Solução                       |                               | Erro<br>percentual<br>(%) |
| Cunha e<br>Castro<br>(2010) | Aula 3, tópico 2,<br>exercício<br>resolvido 2 /<br>Zero da função            | Método da<br>posição falsa<br>(cordas) | 1,4583                        | 1,4584                        | 0,0100                    |
| Cunha e<br>Castro<br>(2010) | Aula 5, tópico 2,<br>exemplo 1 /<br>Solução de<br>sistema de<br>equação      | Gauss-Jacobi                           | x1 = 1,000;<br>x2 = -1,000;   | x1 = 1,000;<br>x2 = -1,000;   | 0,0000                    |
| Cunha e<br>Castro<br>(2010) | Aula 6, tópico 1,<br>exemplo 1 /<br>Coeficientes da<br>equação do<br>gráfico | Ajuste com<br>polinômio de 2º<br>grau  | $f(x) = 1,25x^2 - 5x + 23,75$ | $f(x) = 1,25x^2 - 5x + 23,75$ | 0,0000                    |
| Cunha e<br>Castro<br>(2010) | Aula 7, tópico 3,<br>exemplo 2 /<br>Solução<br>numérica da<br>integral       | Método do<br>trapézio                  | 84,0000                       | 84,0000                       | 0,0000                    |
| Cunha e<br>Castro<br>(2010) | Aula 7, tópico 4,<br>exemplo 1 /<br>Solução<br>numérica da<br>integral       | Método de<br>Simpson                   | 0,7472                        | 0,7472                        | 0,0000                    |

**Fonte:** Autor, 2024.

Observa-se pelo quadro acima que a rota desenvolvida para cálculo numérico apresentou uma excelente precisão, evidenciada pelos resultados de erros relativo.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs o desenvolvimento e aprimoramento do MecTool, inserido na ferramenta computacional funções que apoiam disciplinas essenciais da Engenharia Civil, como Cálculo Numérico, Materiais da Construção e Estruturas de Madeira. Após uma análise crítica das limitações de softwares similares, a nova versão do MecTool foi atualizada em Python, incorporando funcionalidades específicas para cálculo estrutural em madeiras, dosagem de concreto e resolução de problemas matemáticos comuns na área. A ferramenta foi validada utilizando problemas da literatura, garantindo que suas respostas apresentem alta precisão e eficiência no uso acadêmico e profissional.

Os resultados obtidos indicam que a nova versão do MecTool oferece respostas precisas, com erros percentuais próximos de zero em vários testes. A integração de funções avançadas, como o dimensionamento de estruturas de madeira em situações de incêndio e a dosagem de concreto pelo método ABCP, tornou o MecTool uma alternativa robusta para cálculos estruturais e numéricos. O desempenho do MecTool demonstrou consistência, com tempos de processamento semelhantes a outros métodos computacionais, mas com melhorias significativas na abrangência e facilidade de uso, atendendo a uma gama de aplicações em Engenharia Civil. Os resultados obtidos demonstraram uma alta precisão do software, especialmente quando comparados com outros programas e resultados de literatura especializada.

A atualização do MecTool representa uma contribuição importante para a Engenharia Civil, pois amplia as possibilidades de análise em diferentes áreas estruturais e materiais. A ferramenta é um recurso valioso para o ensino e prática profissional, pois oferece uma interface intuitiva e alta precisão.

Nesta conjuntura, junto à atualização do software, também foi elaborado um manual objetivo e direto para uso da mesma, visando facilitar seu emprego no ambiente acadêmico. Outrossim, para o desenvolvimento das novas abas com as áreas adicionadas, a interface desenvolvida foi pensada para ser a mais iterativa e simples, facilitando a compreensão para uso da ferramenta.

O MecTool agora se posiciona como uma ferramenta abrangente para problemas acadêmicos de engenharia, permitindo que engenheiros e estudantes realizem análises mais rápidas e confiáveis. Assim, como sugestões para trabalhos futuros sugere-se a inserção de novas áreas da engenharia bem como possíveis aprimoramentos nas funções já existente

como, por exemplo, a inserção do dimensionamento de pilares e vigas de madeira submetidos a flexão.

A segunda versão do MecTool está disponível para acesso e uso no seguinte endereço:

<https://github.com/Damiao-Dandevs/MecTool/tree/main>

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnica. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 6p.

ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnica. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 81p.

ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnica. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 10p.

Alsarraf, Mohammad J. **Desktop computer programming languages future**. International Journal of Computer Science and Information Technology Research ISSN 2348-120X (online) Vol. 7, Issue 4, pp: (123-133), 2019. Disponível em <<https://www.researchpublish.com/upload/book/DESKTOP%20COMPUTER%20PROGRAMMING-8242.pdf>>. Acesso em 15 de jul. 2024.

American Concrete Institute. **ACI 211-81. Standart Praticice for Selecting Proportion for Normal, Heavyweighth, and Mass Concrete**. ACI manual for concrete praticice. Detroit, Michigan, 1985. (revised 1988). Part I: materials and general Properties of concrete.

Contadini, P. C. P. F. **Bulbo de tensões: Um desenvolvimento computacional gráfico a partir da teoria da elasticidade com geração de relatório em PDF**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. Votuporanga/SP, 2018, 66 p.

Euzébio, Larissa Evangelista & Pereira, Wesley Fonseca. **TraçoFácil: um sistema web para dosagem de concreto convencional utilizando a metodologia da ABCP**. 2021. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado interdisciplinar em ciência e tecnologia) – Universidade federal do Maranhão, Balsas/MA, 2021. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/123456789/5235>>. Acesso em 03 de abr. 2024.

Gilat, AmosPozo. **Métodos numéricos para engenheiros e cientistas: uma introdução com aplicações usando o matlab**. Amos Gilat, Vish Subramaniam; tradução Alberto Resende de Conti. – Porto Alegre, 2008.

Humes, A. F. P. C. et al. **Noções de Cálculo Numérico**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1984.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus Votuporanga. **NEV – Núcleo de Engenharia Virtual**. Disponível em: <<http://vtp.ifsp.edu.br/nev/>>. Acesso em 22 jan. 2024.

Justo, D. A. R. et al. **Cálculo Numérico: Um livro colaborativo – Versão Python**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2020.

Martha, L. F. **Um Programa Gráfico-Interativo para Ensino de Comportamento de**

**Estruturas.** Versão Educacional 3.01, Tecgraf/ PUC-Rio, 2015.

Martha, L. F.; Carbone, A. J.; Pereira, A. R.; Ramires, F. B.; Dalcanal, P. R.; Araújo, R. R. e-**Mohr - Círculo de Mohr para Estado Plano de Tensões.** Disponível em: <<http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/etools/mohr/>>. Acesso em 16 jul. 2024.

Moraes, P. D. **Dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio.** 2015. 159p.

Oliveira, Dairlla Lethicia Santos. **Estruturas de madeira: Implementação de um software para o dimensionamento de peças tracionadas e comprimidas.** Jataí-GO, 2022. 90f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil). IFG: Jataí-GO, 2022. Disponível em: <<http://repositorio.ifg.edu.br:8080/handle/prefix/1379>>. Acesso em: 10 de jun. 2024.

Paulista, Cassio & Alvarenga, Roberta & Lima, André & Santos, Wallan & da Hora, Henrique. **Desenvolvimento de software para solução numérica de equações polinomiais: uma abordagem interdisciplinar.** Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.3, n.2. 2018. Disponível em: <<https://revistas.ifpr.edu.br/index.php/mundietg/article/view/1244/1103>>. Acesso em 12 de jul. 2024.

Pinto, G. A. R. P.; Marin, C. P.; Nirschl, G. C. **Cálculo on-line de círculo de Mohr.** Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2016, Matão/SP, 2016.

Rawat, Ajay. **A Review on Python Programming.** International Journal of Research in Engineering, Science and Management Volume-3, Issue-12, 2020. Disponível em <<https://journal.ijresm.com/index.php/ijresm/article/download/395/368>>. Acesso em: 20 de jul 2024>.

Rodrigues, Públio Penna Firme. **Parâmetros da dosagem racional do concreto.** 34a Reunião de técnicos da indústria do cimento, 1998. Disponível em <[https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/Parametros-dosagem\\_34aRTIC1983.pdf](https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/Parametros-dosagem_34aRTIC1983.pdf)>. Acesso em 03 de mar 2024.

Silva, Juliano & Chamberlain Pravia, Zacarias. **JWood: um objeto educacional para aprendizado de elementos de estruturas de madeira.** Semina Ciências Exatas e Tecnológicas, 2018. 133p. Disponível em: <<https://doi.org/10.5433/1679-0375.2018v39n2p133>>. Acesso em: 8 de jun. 2024.

Silva Aguiar, S., & Alves da Silva, E. **Desenvolvimento e verificação da acurácia de um aplicativo móvel para dosagem de concreto convencional.** RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar. 2023. ISSN 2675-6218, 4(12), e4124571. Disponível em: <<https://doi.org/10.47820/recima21.v4i12.4571>>. Acesso em: 20 de mai. 2024.

Silva, Saul Oliveira da. **Mectool: ferramenta computacional para auxílio nas disciplinas de mecânica dos sólidos e dos solos.** 2021. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Unidade Delmiro Gouveia - Campus do Sertão, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2021.

Souza et. al. **Uso de português estruturado no ensino de aulas de computação com geração automática de códigos em linguagem Python / Uso de português estruturado no ensino de alunos de informática com geração automatizada de código em linguagem**

**Python.** Revista Brasileira de Desenvolvimento, 8(5), 38111–38121. 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.34117/bjdv8n5-354>>. Acesso em 10 de jul. 2024.

## APÊNDICES

### Apêndice A - Conjunto de código responsável pelos ajustes não lineares em R

```
# Exemplo para 44Mpa
x <- c(0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80) #a/c
y <- c(48, 42.9, 37.2, 32.5, 28.3, 25, 21.8, 18.5) #resistencia do concreto

# Dados
ylog <- log(y) # Aplicamos log aos valores de fcj

# Ajuste da regressão linear
ajuste <- lm(ylog ~ x)

# Valores estimados de k1 e k2
coeficientes <- coef(ajuste)
k1 <- exp(coeficientes[1])
k2 <- exp(-coeficientes[2])

# Imprime o resumo do ajuste
cat("Resumo do Ajuste:\n")
cat(paste("k1 =", k1, "\n"))
cat(paste("k2 =", k2, "\n"))

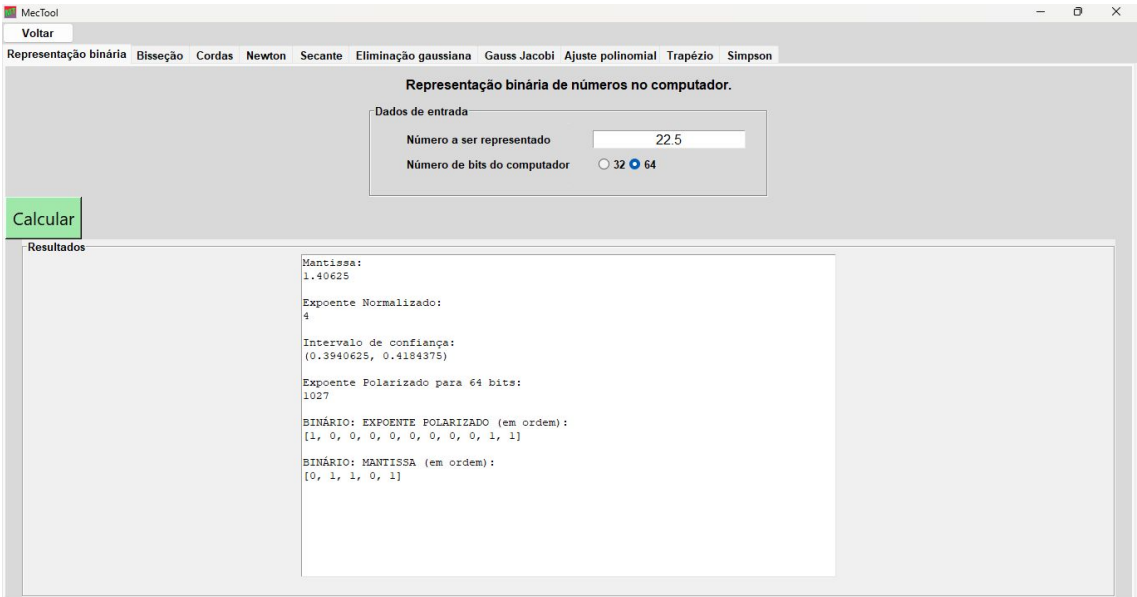
plot(x, y, col='blue', ylim = c(10,50), xlim = c(0.3,0.85), cex=2, ylab = "fcm28 (MPA)",
xlab = 'a/c')
#lines(x,y, col = 'blue', lwd = 2)
fcj_estimado <- k1 / (k2^a)
lines(x, fcj_estimado, type = "l", col = "red", )

#escreva a equação da reta dentro do gráfico
mtext( side=3, line=-3, sprintf( 'fcm28 = (%1.3f) * (%1.3f^(-a/c)) ', k1, k2 ) )
```

```
mtext(side=3,line=1,'fcm28 X a/c \npara uma resistencia fr28 = 44MPa')
```

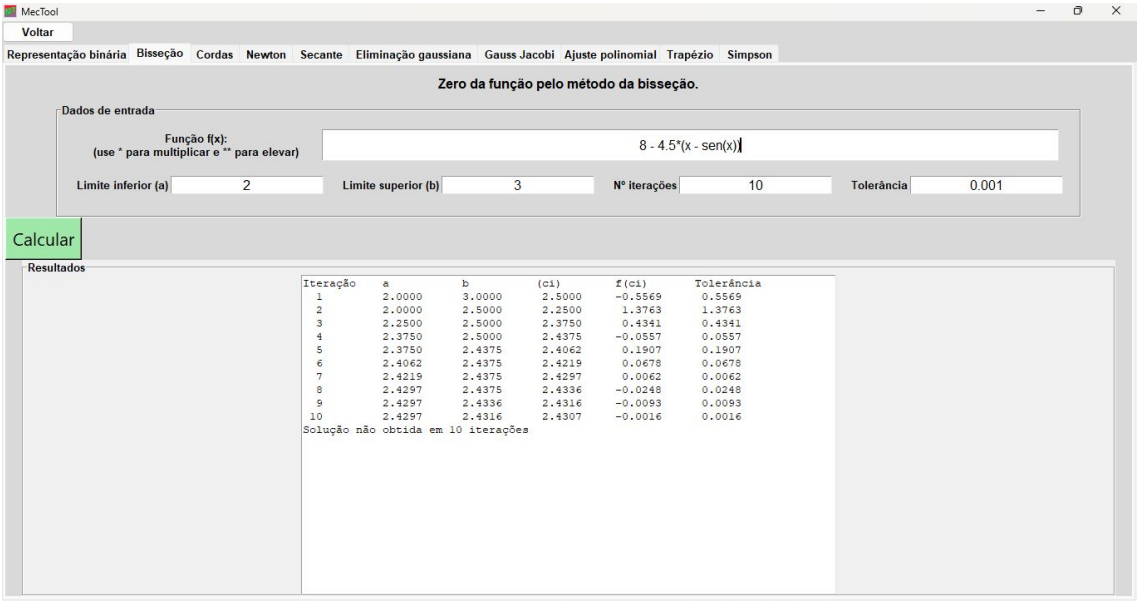
Apêndice B - Conjunto de telas com os dados de entrada e saída para os métodos numéricos.

Figura 21: Aba destinada à representação binária.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 22: Aba destinada ao método da Bisseção.



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 23:** Aba destinada ao método das Cordas.

**Zero da função pelo método das cordas.**

Dados de entrada

Função  $f(x)$ :  
(use \* para multiplicar e \*\* para elevar)  $3*(x**0.5)+\log(x) - 4$

Limite inferior (a)  Limite superior (b)  Nº iterações  Tolerância

**Calcular**

**Resultados**

| Iteração | a      | b      | (c1)   | f(c1)  | Tolerância |
|----------|--------|--------|--------|--------|------------|
| 1        | 1.0000 | 2.0000 | 1.5166 | 0.1110 | 0.1110     |
| 2        | 1.0000 | 1.5166 | 1.4650 | 0.0130 | 0.0130     |
| 3        | 1.0000 | 1.4650 | 1.4590 | 0.0015 | 0.0015     |
| 4        | 1.0000 | 1.4590 | 1.4584 | 0.0002 | 0.0002     |

**Fonte:** Autor, 2024.

**Figura 24:** Aba destinada ao método de Newton.

**Zero da função pelo método de newton.**

Dados de entrada

Função  $f(x)$ :  
(use \* para multiplicar e \*\* para elevar)  $8 - 4.5*(x - \sin(x))$

Limite inferior (a)  Limite superior (b)  Nº iterações  Tolerância

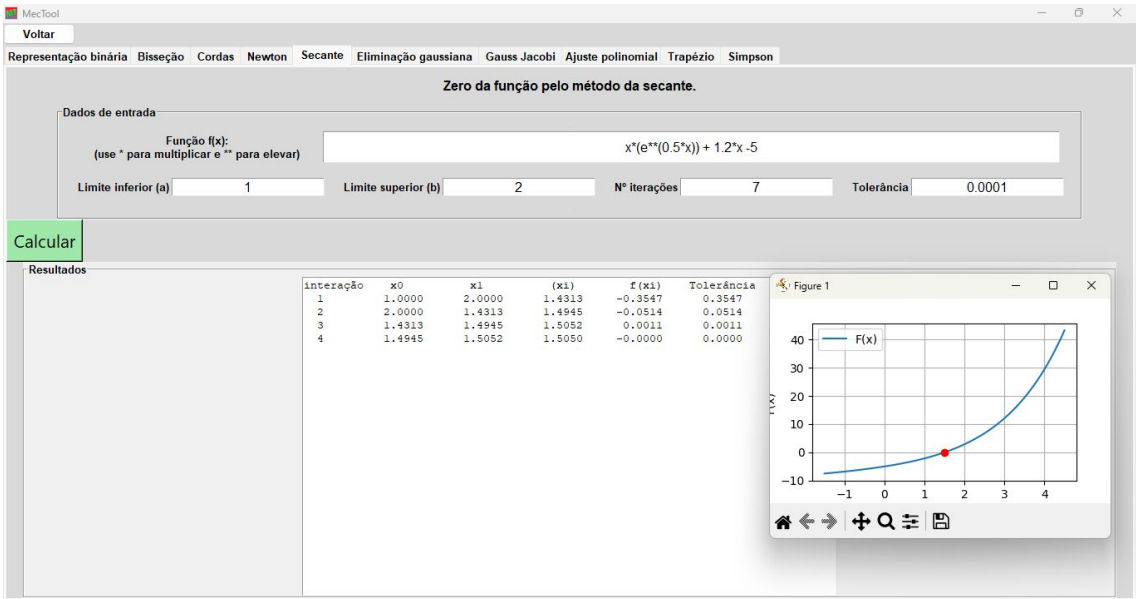
**Calcular**

**Resultados**

| Interação | X1     | f(X1)   | Tolerância |
|-----------|--------|---------|------------|
| 1         | 2.4852 | -0.4370 | 0.4370     |
| 2         | 2.4910 | -0.0041 | 0.0041     |

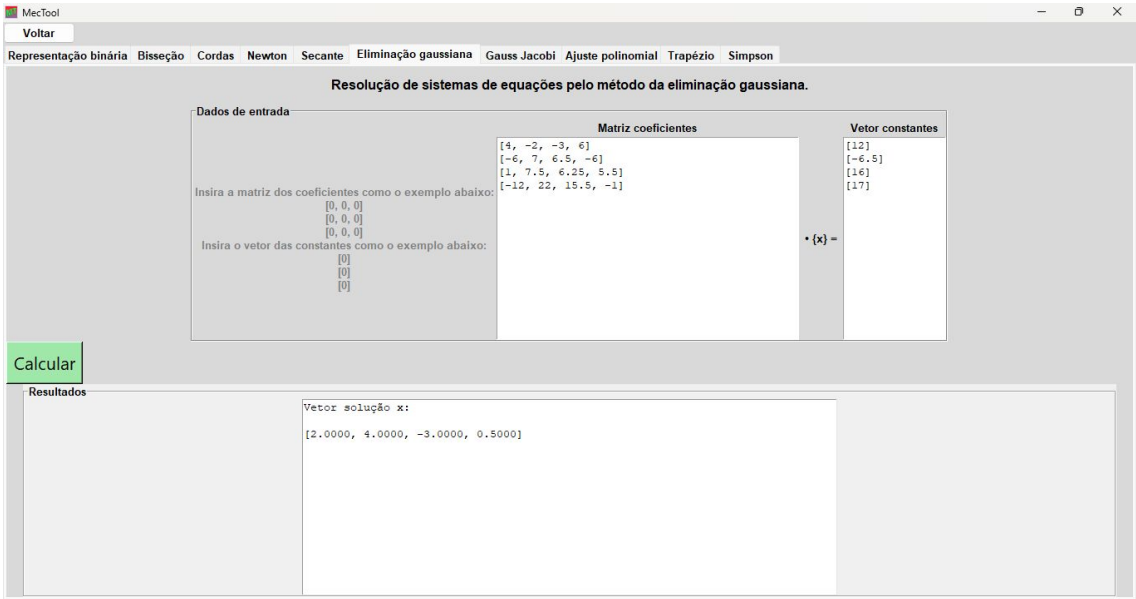
**Fonte:** Autor, 2024.

Figura 25: Aba destinada ao método da secante.



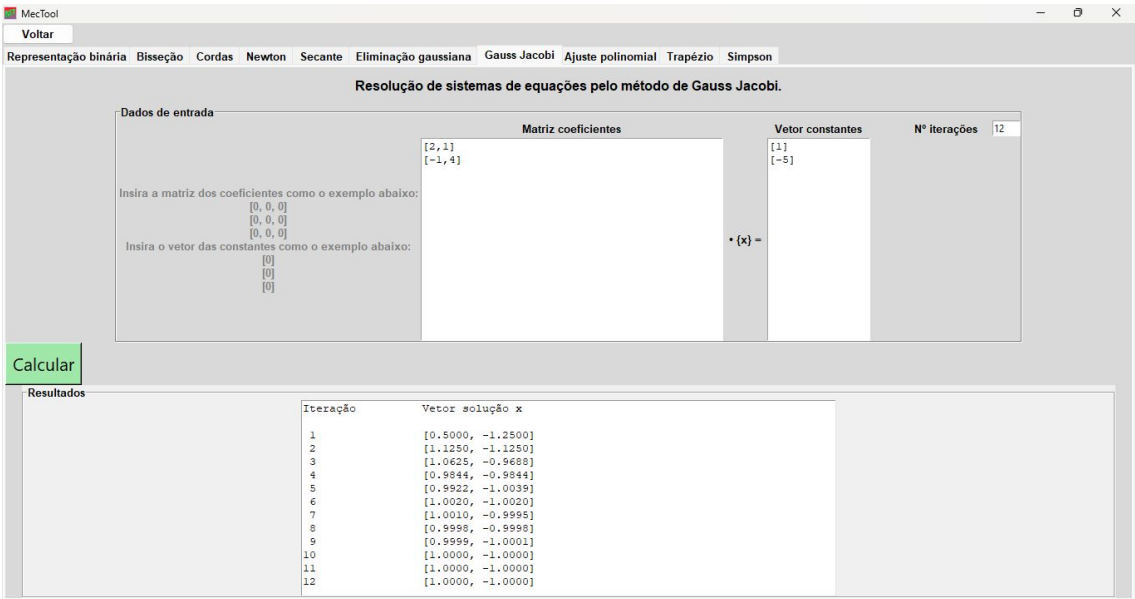
Fonte: Autor, 2024.

Figura 26: Aba destinada ao método da eliminação gaussiana.



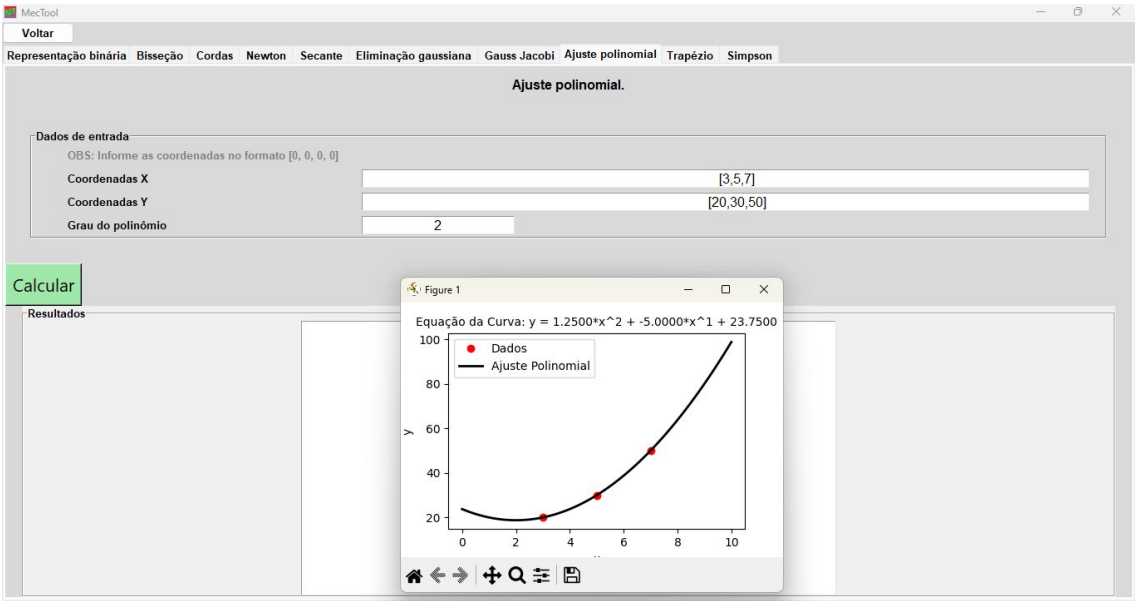
Fonte: Autor, 2024.

Figura 27: Aba destinada ao método de Gauss Jacobi.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 28: Aba destinada ao ajuste polinomial.



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 29:** Aba destinada à regra do trapézio.

The image shows a software window titled 'MecTool' with a menu bar containing 'Voltar', 'Representação binária', 'Bisseção', 'Cordas', 'Newton', 'Secante', 'Eliminação gaussiana', 'Gauss Jacobi', 'Ajuste polinomial', 'Trapézio', and 'Simpson'. The 'Trapézio' tab is selected, and the window title is 'Integração numérica pela regra do Trapézio.'.

The interface is divided into two main sections: 'Dados de entrada' and 'Resultados'.

**Dados de entrada:**

- Insira as coordenadas:** Includes a text box for 'Coordenadas X' with the value '[1,2,3,4,5]', a text box for 'Coordenadas Y' with the value '[3,7,15,31,59]', and input fields for 'Limite inferior' (1) and 'Limite superior' (5). A green 'Calcular' button is present.
- OU**
- Insira a função:** Includes a text box for 'Função f(x):', input fields for 'Limite inferior' and 'Limite superior', and a 'Subintervalos' input field. A green 'Calcular' button is present.

**Resultados:**

A text box displays the result: 'A Integral usando o Método do Trapézio Repetido Vale: 84.0'.

**Fonte:** Autor, 2024.