



CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS - UNICHRISTUS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CLÁUDIA MARIANA COSTA MAIA

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE
CAPACIDADE ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

FORTALEZA - CE

2021

CLÁUDIA MARIANA COSTA MAIA

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE
CAPACIDADE ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Christus como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Bergson da Silva Matias.

FORTALEZA - CE
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M217d Maia, Cláudia Mariana Costa.
 Desenvolvimento de ferramenta computacional para análise de
 capacidade estrutural de vigas de concreto armado / Cláudia
 Mariana Costa Maia. - 2021.
 62 f. : il. color.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
 Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,
 Fortaleza, 2021.
 Orientação: Prof. Me. Bergson da Silva Matias.

 1. Vigas. 2. Capacidade resistente. 3. Concreto armado. 4.
 Implementação. 5. Momento fletor. I. Título.

CDD 624

CLÁUDIA MARIANA COSTA MAIA

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE
CAPACIDADE ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil do Centro Universitário
Christus, como parte integrante dos
requisitos para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas de
Concreto Armado

Aprovada em: 14/01/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Bergson da Silva Matias (Orientador)

Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Prof. Me. Erivano Lucio Passos

Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Prof. Especialista Agérbon César Cunha da Nobrega

Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

“Nothing is more creative... nor destructive... than a brilliant mind with a purpose.”

- Dan Brown

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus e aos meus pais, Ana Cláudia e Berguinho, por sempre terem acreditado em mim e me dado forças para conseguir concluir. Aos meus avós, Chico e Nora, por mesmo sem terem estudado sempre me apoiaram e me ajudaram nos momentos de necessidade. Ao meu avô Cláudio e minha querida vó Madalena por terem me acolhido e me ensinado a viver tão distante de todos para que fosse possível estudar. Sei que essa realização é um sonho para vocês também, de terem uma filha, uma neta, formada.

Para aquelas que me fizeram companhia durante essa jornada, Maria Cláudia, Cláudia Karoline e minha irmãzinha Ana Maria Cláudia.

Para todos aqueles que conviveram comigo nesse período difícil e fizeram a caminhada árdua se tornar mais leve com nossas conversas e risadas de desespero: Ana Carolina Magalhães, Dara Nascimento, Taynah Lima, Nayara Gurjão, Fernanda Moreira, João Vitor, Ygor Tavares e Ennio Carlos. Para os mestres que trouxeram alegria mesmo quando o conteúdo era assustador: Bergson Matias, Eric Mateus, Paula Nobre, Franco Matos e Willington Gondim. Vocês fizeram tudo isso ficar suportável e gratificante, obrigada!

Para aqueles que mesmo de fora sempre me apoiaram: Sarah Magna, Iohran Medeiros e Ulric Marques vocês sempre me ouviram e sentiram minhas dores, além de trazerem alegrias quando eu precisava. Para aquele que esteve presente em praticamente todos os momentos, me fazendo refletir quando eu já não tinha condições de pensar, me fazendo estudar quando a minha mente queria desistir e me trazendo momentos felizes para esquecer o peso de tudo que eu carregava, você foi incrível e obrigada por ser minha companhia, Rodrigo Chaves.

RESUMO

No decorrer da concepção de uma estrutura, diversas falhas podem existir durante o projeto ou execução, levando a uma redução da vida útil e segurança que a obra necessita. Para isso as manutenções e reforços vem como alternativa para suprir os problemas ocasionados pelas manifestações patológicas. Devido à suma importância da manutenção e do reforço que as estruturas de concreto armado demandam, o presente trabalho tem como finalidade expor o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o auxílio da verificação estrutural de vigas seção retangular ou T sujeitas a flexão simples, a B-Strength. O procedimento de cálculo adotado foi implementado de acordo com as recomendações normativas da NBR 6118:2014. A entrada de dados serão as características mecânicas e geométricas da seção da viga e as informações das áreas de aço. Os resultados serão a profundidade da linha neutra e o momento fletor máximo da seção. Também será possível considerar a perda de seção das armaduras, devida à corrosão, através da redução da área de aço no cálculo. A redução permitida pela ferramenta varia entre 0% e 50%. O processo de cálculo iterativo adotado pela ferramenta será o Método da Bissecante. Para a elaboração da ferramenta computacional será utilizada a linguagem Python, devido a sua facilidade de implementação e alta aplicação no mercado da tecnologia. Além disto, será adotado o método estruturado. Este método traz como benefícios uma quantidade reduzida de linhas de comando e facilidade de manutenção e atualização. A validação da ferramenta será feita através de exemplos práticos solucionados anteriormente por uma planilha desenvolvida no ambiente *Microsoft Excel®* e disponibilizada pelo professor Me. Bergson Matias.

Palavras-chave: Vigas. Capacidade resistente. Concreto armado. Implementação. Momento fletor.

ABSTRACT

During the design of a structure, several failures can exist during the project or execution, leading to a reduction in the useful life and safety that the work requires. For this, maintenance and reinforcement is an alternative to supply the problems caused by pathological manifestations. Due to the importance of the maintenance and reinforcement that the reinforced concrete structures demand, the present work aims to expose the development of a computational tool to aid the structural verification of rectangular or T section beams subject to simple bending, the B-Strength. The calculation procedure adopted was implemented in accordance with the normative recommendations of NBR 6118:2014. The data entry will be the mechanical and geometric characteristics of the beam and the reinforcement area informations. The results will be the depth of the neutral line and the maximum bending moment of the section. It will also be possible to consider the loss of reinforcement section due to corrosion, by reducing the steel area in the calculation. The reduction allowed by the tool varies between 0% and 50%. The iterative calculation process adopted by the tool will be the Bissecante Method. For the development of the computational tool, the Python language will be used, due to its ease of implementation and high application in the technology market. In addition, the structured method will be adopted. This method benefits from a reduced number of command lines and ease of maintenance and updating. The validation of the tool will be done through practical examples previously solved by a spreadsheet developed in the Microsoft Excel® environment and made available by Professor Me. Bergson Matias.

Keywords: Beams. Bearing capacity. Reinforced concrete. Implementation. Bending moment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Domínios de deformação	20
Figura 2 - Corrosão em laje.....	26
Figura 3 - Classificação da seção como a) T e b) falso T	29
Figura 4 - a)Momento resistido pelas abas da mesa e b)Momento resistido pela alma	30
Figura 5 - Seção T com múltiplas camadas de armadura	32
Figura 6 - Domínio 2	33
Figura 7 - Domínios 3 e 4.....	34
Figura 8 - Diagrama de tensão-deformação do aço	34
Figura 9 - Resultante das tensões na seção	35
Figura 10 - Método da bissecante	36
Figura 11 - Fluxograma principal (<i>main</i>).....	39
Figura 12 - Fluxograma da rotina secundária.....	40
Figura 13 - Planilha de Verificação Seção Retangular	42
Figura 14 - Planilha de Verificação Seção T	42
Figura 15 - Exemplo 1: Seção.....	43
Figura 16 - Exemplo 2: Seção.....	43
Figura 17 - Exemplo 3: Seção.....	44
Figura 18 - Exemplo 4: Seção.....	45
Figura 19 - Exemplo 5: Seção.....	45
Figura 20 - Exemplo 6: Seção.....	46
Figura 21 - Exemplo 7: Seção.....	47
Figura 22 - Ícone do B-Strength	48
Figura 23 - Tela Inicial.....	48
Figura 24 - Tela da Seção Retangular	49
Figura 25 - Tela da Seção T.....	49
Figura 26 - Camadas de Aço	50
Figura 27 - Características dos Materiais	50
Figura 28 - Visualização de Resultados	51
Figura 29 - Janela de Salvar	51
Figura 30 - Layout do Relatório	52
Figura 31 - Mensagem de Erro	52

Figura 32 - Seções de Vigas Retangulares a) Ex.1 – Viga Retangular com Armadura Dupla b) Ex. 2 – Viga Retangular com Múltiplas Camadas de Aço c) Ex. 3 – Viga Retangular com Múltiplas Camadas de Aço com Perda de Seção	53
Figura 33 – Momento Resistente X Perda de Seção para as Vigas Retangulares ...	54
Figura 34 - Seções de Vigas T a) Ex. 4 – Falso T com Armadura Simples b) Ex. 5 – Viga T com Armadura Simples c) Ex. 6 – Viga T com Múltiplas Camadas de Aço d) Ex. 7 – Viga T com Múltiplas Camadas de Aço com Perda de Seção	55
Figura 35 – Momento Resistente X Disposição de Armaduras para as Vigas T	56
Figura 36 - Momento Resistente X Perda de Seção para as Vigas T	56
Figura 37 – Linha Neutra X Perda de Seção para as Vigas T	57

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Coeficiente de segurança.....	17
Tabela 2 - Valores de α_E	18
Tabela 3 - Coeficiente de segurança γ_s	18
Tabela 4 - Diâmetros e áreas das barras de aço.....	19
Tabela 5 - Valores de γ_g e γ_q	22
Tabela 6 - Valores dos fatores de combinação	23
Tabela 7 - Classe de Agressividade Ambiental	24
Tabela 8 - Cobrimento mínimo	24
Tabela 9 - Valores de máximos de w_r de acordo com as classes de agressividade ..	25
Tabela 10 - Taxas mínimas da armadura de flexão $\rho_{\min}$ (%)	31
Tabela 11 - Exemplo 1: Camadas de Aço	42
Tabela 12 - Exemplo 2: Camadas de Aço	43
Tabela 13 - Exemplo 3: Camadas de Aço	44
Tabela 14 - Exemplo 6: Camadas de Aço	46
Tabela 15 - Exemplo 7: Camadas de Aço	47
Tabela 16 – Resultados para Seção Retangular	53
Tabela 17 - Erro das Seções Retangulares.....	53
Tabela 18 - Resultados Seção T	55
Tabela 19 - Erro das Seções T	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	<i>14</i>
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>14</i>
1.2	Estrutura do trabalho	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Concreto Armado	16
2.1.1	<i>Propriedades do Concreto</i>	<i>16</i>
2.1.2	<i>Propriedades do Aço</i>	<i>18</i>
2.2	Estados Limites	19
2.3	Ações e Carregamentos	21
2.4	Classes de Agressividade Ambiental	23
2.5	Recuperação e Reforço	25
2.6	Dimensionamento da Armadura Longitudinal para Vigas de Seção T ..	28
2.6.1	<i>Para $d \geq d_0$</i>	<i>30</i>
2.6.2	<i>Para $d < d_0$</i>	<i>30</i>
2.6.3	<i>Armadura Mínima, Máxima e de Pele</i>	<i>31</i>
2.7	Verificação da Capacidade Resistente de Vigas	32
3	METODOLOGIA	38
3.1	Roteiro de cálculo	38
3.2	Linguagem de programação	41
3.3	Validação	41
3.4	Exemplos de aplicação	42
3.4.1	<i>Ex. 1 – Viga Retangular com Armadura Dupla</i>	<i>42</i>
3.4.2	<i>Ex. 2 – Viga Retangular com Múltiplas Camadas de Aço</i>	<i>43</i>
3.4.3	<i>Ex. 3 – Viga Retangular com Múltiplas Camadas de Aço com Perda de Seção</i>	<i>44</i>
3.4.4	<i>Ex.4 – Falso T com Armadura Simples</i>	<i>44</i>
3.4.5	<i>Ex. 5 – Viga T com Armadura Simples</i>	<i>45</i>
3.4.6	<i>Ex. 6 – Viga T com Múltiplas Camadas de Aço</i>	<i>46</i>
3.4.7	<i>Ex. 7 – Viga T com Múltiplas Camadas de Aço com Perda de Seção</i>	<i>46</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	A ferramenta computacional: B-Strength	48

4.2	Seção Retangular	52
4.3	Seção T	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
<u> </u>	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado se tornou o material mais utilizado na construção civil. Os motivos que levam ao concreto estar presente na maioria das obras, sejam elas formais ou informais, incluem: facilidade em ser moldado, alta resistência à compressão e elevada durabilidade. No entanto, é um material que possui baixa resistência à tração, fazendo-se necessário o uso do aço para absorver a esses esforços, formando assim, o concreto armado.

Os engenheiros calculistas comumente utilizam o concreto armado para a concepção de estruturas. Essas estruturas necessitam ser dimensionadas de forma que estejam a favor da segurança, sejam economicamente viáveis e possuam alta durabilidade. Para isso, a norma NBR 6118:2014 abrange o procedimento para a elaboração do projeto de estruturas que servirá de base para a execução das construções.

As normas brasileiras têm função de balizar os parâmetros adotados no sistema de elaboração e execução de obras civis, no intuito de evitar erros como o sub e superdimensionamento das estruturas, evitando gastos desnecessários e garantindo sua integridade e segurança. Diante disso, as normas se tornam de suma importância para a elaboração de um projeto estrutural de qualidade.

O projeto estrutural serve de base para a construção de um empreendimento. Entre as vantagens de seu uso incluem-se a economia, qualidade do produto final, facilidade da execução e vida útil da estrutura. Além disso, um projeto estrutural bem elaborado e executado implica em uma menor quantidade de erros futuros, evitando retrabalhos e custos desnecessários. Neville (2016) sugere que os responsáveis pelo projeto, construção e manutenção trabalhem em conjunto para a extensão da vida útil, definindo medidas mínimas de inspeção, monitoramento e manutenção preventiva.

Após executado o projeto, a estrutura em utilização necessitará, eventualmente, de manutenções, a fim de proporcionar o aumento ou a garantia da vida útil. Além disso, reformas poderão ser feitas de acordo com as novas necessidades do usuário. Para a execução dessas manutenções e reformas é imprescindível a realização de verificações no imóvel, estas podem ser do tipo material ou estrutural.

A verificação referente ao material, constitui-se de uma investigação das manifestações patológicas, essas, geralmente ocasionadas por influências ambientais, que podem vir a comprometer a durabilidade das estruturas. Diante disso, Bolina *et al.* (2019) afirmam que o sucesso de uma intervenção corretiva é definido pela qualidade do diagnóstico. Assim, após o detalhamento das patologias, o engenheiro poderá fazer um projeto de recuperação do concreto objetivando a restauração da qualidade do mesmo.

A verificação da estrutura consiste em uma análise local dos elementos com o propósito de calcular a máxima capacidade dos mesmos, de acordo com suas dimensões, armaduras e modelo estrutural. Para sua realização, é necessário o projeto estrutural para a averiguação dos dados. Caso não seja possível o acesso ao projeto estrutural, é recomendada uma visita *in loco* onde faz precisos ensaios e medições para a obtenção dessas informações.

Após a aquisição dos dados, utilizam-se os mesmos em um modelo matemático que pode ser calculado de forma manual ou computacional. Existe uma dificuldade para os engenheiros encontrarem ferramentas que os auxiliem no cálculo do modelo matemático, embora exista uma necessidade na área devido à grande quantidade de manutenções e reformas que as estruturas demandam.

Diante do exposto, é imprescindível que a comunidade científica trabalhe para contribuir na automatização do processo de verificação estrutural, através do desenvolvimento de ferramentas computacionais. Essas devem oferecer segurança nos resultados, além de acelerar a produção dos projetos de reforço quando estes se fazem necessário.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta computacional para a verificação da capacidade resistente na flexão simples de vigas para as seções retangular e T.

1.1.2 Objetivos Específicos

a) Automatizar o cálculo do dimensionamento da capacidade resistente de vigas das seções retangulares e T;

- b) Implementar o método matemático para a verificação da capacidade resistente de vigas utilizando a linguagem Python;
- c) Validar a ferramenta implementada com exemplos práticos.
- d) Utilizar a ferramenta para estudar a influência da corrosão nas armaduras na capacidade resistente das vigas.

1.2 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 é formado pela revisão bibliográfica acerca do concreto, estados limites, resistência de cálculo, ações, dimensionamento e verificação da capacidade resistente de vigas. Além de um breve estudo sobre a linguagem utilizada na programação da ferramenta computacional.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da ferramenta e as considerações aplicadas para os limites que a ferramenta possui.

O Capítulo 4 é constituído dos resultados gerados pelo uso da ferramenta validando-os através de uma comparação com os exemplos previamente resolvidos na literatura.

Finalmente, o Capítulo 5 refere-se as considerações finais, sobre o desenvolvimento e os resultados da ferramenta. Encontra-se também as sugestões propostas para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta a revisão bibliográfica explorada para o embasamento teórico do trabalho. Nela, estão explanadas a definição do concreto armado, as propriedades de seus materiais (concreto e aço), os estados limites, as ações e suas combinações. Além disso, está descrito o procedimento para o dimensionamento de vigas de concreto armado, bem como o método utilizado para a verificação da carga resistente.

2.1 Concreto Armado

A NBR 6118:2014 define elementos de concreto armado sendo aqueles em que a aderência, entre o concreto e a armadura, é fator fundamental para o comportamento estrutural. A união desses dois materiais permite ao concreto armado suportar tantos esforços de tração quando de compressão.

“Os esforços de compressão são contidos pelo concreto, que possui grande resistência a esses esforços, enquanto ao aço cabe assegurar a estabilidade, devido à sua resistência a esforços de tração” (BORGES, 2015).

2.1.1 *Propriedades do Concreto*

O concreto é um material composto por agregados graúdos e miúdos misturados em um meio aglutinante geralmente composto por água e cimento, podendo ainda ser complementado por adições minerais e aditivos químicos. Assim, é caracterizado como sendo um material isotrópico necessitando de controle e estudos acerca das suas propriedades físicas e mecânicas, entre essas se pode mencionar a resistência à compressão e a tração, peso próprio e módulo de elasticidade.

A propriedade mecânica mais relevante do concreto é a sua resistência à compressão. Isto porque esta propriedade não funciona de maneira isolada, e sim atrelada a outros parâmetros, conforme Parizotto (2017). Para a obtenção dos valores da resistência à compressão, a NBR 5739:2018 descreve as etapas a serem realizadas para o ensaio de corpos de prova seja eles os moldados ou os testemunhos. Estes últimos são normatizados pelos documentos NBR 5738:2015 e a NBR 7680-1:2015 respectivamente.

A resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}) é definida por uma amostragem especificada na NBR 12655:2015 dos ensaios realizados nos corpos de provas e testemunhos. Para corpos de prova moldados, o f_{ck} deverá ser referente à resistência do concreto com idade de 28 dias, quando não especificado.

A NBR 6118:2014 preconiza que seja utilizada a resistência à compressão de projeto do concreto (f_{cd}) para o cálculo das estruturas. O f_{cd} por sua vez corresponde ao f_{ck} minorado por um coeficiente de segurança (γ_c), fixado de acordo com as combinações de cargas no estado limite último (ELU), definidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficiente de segurança

Combinações	γ_c
Normais	1,4
Especiais ou de construção	1,2
Excepcionais	1,2

Fonte: Adaptado de NBR 6118:2014.

Sabe-se que a resistência a tração do concreto é substancialmente inferior quando comparado a sua resistência à compressão. Para efeitos de cálculo a NBR 6118:2014 determina a resistência a tração direta inferior ($f_{ct,inf}$) e superior ($f_{ct,sup}$) para concretos de resistência à compressão até 50 MPa, conforme as expressões

$$f_{ct,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad (1)$$

$$f_{ct,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad (2)$$

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (3)$$

onde $f_{ct,m}$ e f_{ck} são expressos em MPa.

O peso específico é mais uma propriedade relevante para o dimensionamento e verificação de elementos, pois ele determina a carga que a estrutura irá suportar, causada somente por seu peso próprio. Quando não existir o valor do peso específico através de experimentos, a NBR 6120:2019 define que deve ser adotado 24 kN/m³ para concreto simples e 25 kN/m³ para concreto armado.

A propriedade mecânica que define a rigidez de um material sólido é o módulo de elasticidade ou módulo de *Young*. É determinado pela razão entre a tensão e deformação. A norma NBR 8522:2017 descreve o ensaio realizado para obtenção do módulo de elasticidade do concreto. Na ausência de experimentos a norma NBR

6118:2014 define o módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) para concretos de 20 a 50 MPa, e o módulo de deformação secante (E_{cs}) como sendo

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (5)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (6)$$

onde f_{ck} , E_{ci} e E_{cs} são dados em MPa e α_E de acordo com o tipo de brita como é demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de α_E

Brita	α_E
Basalto e Diabásio	1,2
Granito e Gnaisse	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

Fonte: Adaptado de NBR 6118:2014

2.1.2 Propriedades do Aço

De acordo com Oliveira *et al* (2014) o motivo para o qual se utiliza o aço na armadura do concreto é devido a sua elevada resistência à tração, além disso é um material que possui alta ductilidade. Para o cálculo do dimensionamento e verificação serão utilizados os aços CA-50 e CA-60 normatizados pela NBR 7480:2007. O primeiro, possui resistência à tração característica de escoamento (f_{yk}) de 500 MPa ou 50 kN/cm². O CA-60, por sua vez, detém uma resistência de 600 MPa ou 60 kN/cm².

A resistência à tração de projeto (f_{yd}) é obtida através da minoração do f_{yk} pelo coeficiente de segurança (γ_s), determinado pela norma NBR 6118:2014, considerando as combinações do estado limite último, como exposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficiente de segurança γ_s

Combinações	γ_s
Normais	1,15
Especiais ou de construção	1,15
Excepcionais	1,0

Fonte: Adaptado de NBR 6118:2014

A NBR 7480:2007 define também os diâmetros e suas respectivas áreas, que podem ser encontrados nas barras de aço de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Diâmetros e áreas das barras de aço

Diâmetro Nominal (ϕ) mm	Área da seção mm²
6,3	31,2
8	50,3
10	78,5
12,5	122,7
16	201,1
20	314,2
22	380,1
25	490,9
32	804,2
40	1256,6

Fonte: Adaptado da NBR 7480:2007

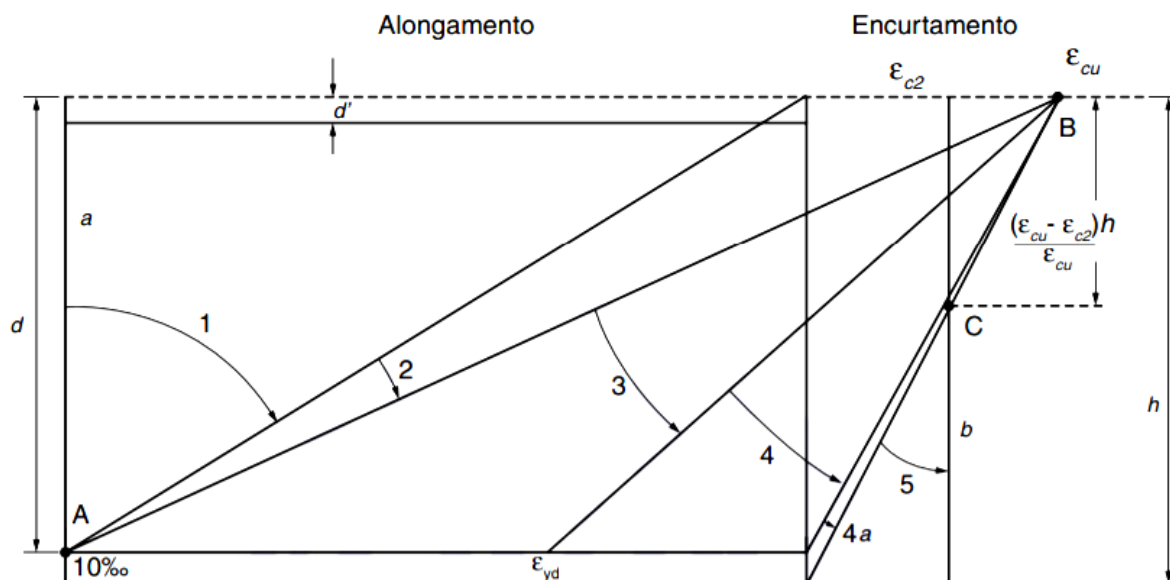
O módulo de elasticidade do aço (E_s) pode ser definido através de ensaios realizados pelos fabricantes das barras. Para a NBR 6118:2014, quando este valor não está especificado deve-se adotar $E_s = 200$ GPa.

2.2 Estados Limites

O estado-limite é definido como sendo a situação para o qual uma estrutura deixa de desempenhar sua função, considerando o máximo carregamento possível e as características físicas e geométricas dos elementos existentes. As estruturas de concreto armado devem ser projetadas atendendo a níveis de segurança satisfatórios, esta segurança está condicionada a verificação de estados limites (OLIVEIRA, 2014).

O estado limite último (ELU) é caracterizado como o estado da estrutura que impossibilite sua utilização. Este pode ocorrer por colapso, deformação, instabilidade, entre outros como descreve a norma NBR 8681:2003. No caso de vigas e lajes, suas deformações acontecem de forma compatível com os domínios definidos pela norma NBR 6118:2014 e que estão ilustrados na Figura 1 e descritos em seguida.

Figura 1 - Domínios de deformação



Fonte: NBR 6118:2014

A retas a e b referem-se à tração e compressão uniforme, respectivamente. No domínio 1 ocorre somente a tração não uniforme e o colapso advém da ruptura do aço devido a sua deformação igual a 10‰. No domínio 2 o concreto sofre compressão, situando-se até a deformação específica de encurtamento no início do patamar plástico (ϵ_{c2}), contudo o aço encontra-se no seu limite. No domínio 3 o concreto atingiu a deformação específica de encurtamento na ruptura (ϵ_{cu}) e o aço por sua vez apresenta-se no estado plástico pois superou sua deformação específica de escoamento (ϵ_{yd}). No domínio 4 o concreto sofre ruptura enquanto o aço deforma-se apenas no domínio elástico. No domínio 4a o aço não sofre tração e o concreto encontra-se na ϵ_{cu} . Por fim, o domínio 5 é caracterizado pela compressão não uniforme.

A norma NBR 6118:2014 define os estados limites de serviço (ELS) como sendo “aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas”. Deformações excessivas, elevadas vibrações e danos localizados são exemplos característicos do ELS.

2.3 Ações e Carregamentos

As ações são cargas e deformações que, conforme a NBR 6120:2019, geram esforços solicitantes na estrutura. A NBR 8681:2003 classifica as ações, em relação a variabilidade no tempo, como sendo as ações permanentes, as ações variáveis e as ações excepcionais.

Ações que apresentam pouca variação ou são praticamente constantes, enquadram-se nas ações permanentes, como o peso próprio das estruturas, do revestimento e das instalações. Em contra partida, as ações variáveis são aquelas que possuem grande oscilação, são exemplos as cargas acidentais em decorrência do uso da estrutura. Parizotto (2017) define as ações excepcionais, como sendo aquelas que possuem uma duração baixa e uma menor probabilidade de acontecer, elas podem ser causadas por incêndios, enchentes entre outros.

Os carregamentos são definidos através da combinação de ações de acordo com sua frequência. Segundo a NBR 8681:2003 as combinações últimas (F_d) podem ser categorizadas como normais, especiais, excepcionais ou de construção, ao passo que, as combinações de serviço ($F_{d,ser}$) são classificadas como quase permanentes, frequentes e raras.

A NBR 8681:2003 pormenoriza que o carregamento normal consiste da utilização prevista durante a vida útil da estrutura. Quando as ações variáveis produzem efeitos que superam os causados pelas ações permanentes é empregado, para efeitos de cálculo, o carregamento especial. Somente é necessário a aplicação do carregamento excepcional quando o projeto estrutural incluir efeitos, causados por ações excepcionais, não desprezíveis. Caso exista, ações que só ocorrem durante a fase de obra, é recomendado que o carregamento de construção seja considerado para verificação do estado limite último.

As combinações últimas normais que serão aplicadas ao longo do presente trabalho, são calculadas, de acordo com a NBR 8681:2003, através da equação

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k} \right] \quad (7)$$

onde:

$F_{Gi,k}$ = valor característico das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ = valor característico da ação variável considerada principal;

$F_{Qj,k}$ = valor característico das demais ações variáveis;

γ_{gi} = coeficiente de ponderação para ações permanentes;

γ_q = coeficiente de ponderação para ações variáveis;

ψ_{0j} = fator de combinação para ações variáveis;

m = número de ações permanentes;

n = número de ações variáveis.

Os valores dos coeficientes de ponderação utilizados na equação das combinações últimas estão definidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de γ_g e γ_q

Combinações Últimas de Ações	Ações			
	Permanententes		Variáveis	
	Desfavorável	Favorável	Geral	Temperatura
Normais	1,4	1,0	1,4	1,2
Especiais ou de Construção	1,3	1,0	1,2	1,0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0

Fonte: Adaptado de NBR 6118:2014

As combinações quase permanentes são aquelas que operam na maior parte do tempo e que são utilizadas para a verificação do estado-limite de deformações excessivas. Divergindo das combinações frequentes que, possuem uma periodicidade maior e são aplicadas nas verificações referentes à abertura de fissuras e vibrações excessivas. A NBR 6118:2014 expõe que as combinações raras são aquelas que ocorrem poucas vezes e são adotadas para a verificação do estado-limite de formação de fissuras.

A combinação de serviço quase permanente será usufruída para o desenvolvimento da ferramentação, e é calculada conforme a expressão

$$F_{d,ser} = \sum F_{Gi,k} + \sum \psi_{2j} F_{Qj,k} \quad (8)$$

onde:

$F_{Gi,k}$ = valor característico das ações permanentes;

$F_{Qj,k}$ = valor característico das demais ações variáveis;

ψ_{2j} = fator de combinação para ações variáveis;

Os valores dos fatores de combinação que serão usados nas cargas variáveis das equações 7 e 8 estão prescritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores dos fatores de combinação

Ações		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^a	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^b	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

^a Edifícios residenciais.

^b Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Fonte: Adaptado de NBR 6118:2014

Pode-se observar que os coeficientes de minoração são definidos conforme os tipos de ações e utilidades que a estrutura poderá possuir.

2.4 Classes de Agressividade Ambiental

As ações externas dos ambientes em que se encontram os elementos estruturais podem ser fatores definitivos para a durabilidade de uma determinada estrutura. Essas ações podem gerar manifestações patológicas no concreto e aço, como carbonatação e corrosão respectivamente, vindo a comprometer o funcionamento de uma estrutura de concreto armado. Dito isso, Cabral e Campos (2016) expõem que caracterizar a região onde a estrutura será construída é de fundamental importância para desenvolver medidas preventivas com o objetivo da garantia de durabilidade. Para isso a NBR 6118:2014 definiu as classes de agressividade ambiental.

As classes de agressividade ambiental (CAA) são categorias utilizadas para a definição dos níveis de agressividade do meio em decorrência a ações químicas e físicas que agem no concreto e que não são previstas no dimensionamento de estruturas, como exposto na norma NBR 6118:2014 e definidas na Tabela 7.

Tabela 7 - Classe de Agressividade Ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fracá	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118:2014

A CAA definirá os cobrimentos mínimos que a armadura deverá possuir para garantia de sua durabilidade e cálculo da altura útil, que será utilizada no dimensionamento e verificação das vigas sujeitas a flexão simples. A Tabela 8 mostra os valores dos cobrimentos, definidos pela NBR 6118:2014, utilizados para vigas de concreto armado conforme sua CAA.

Tabela 8 - Cobrimento mínimo

Classe de Agressividade Ambiental	I	II	III	IV
Cobrimento Mínimo (mm)	25	30	40	50

Fonte: Adaptado de NBR 6118:2014

A abertura máxima característica de fissuras (w_f) é definida conforme as classes de agressividade ambiental, isto porque as fissuras estão diretamente relacionadas com a exposição da armadura ao meio, fazendo assim, necessário um

controle mais rigoroso durante a fase de projeto e execução. A NBR 6118:2014 pormenoriza os valores de w_r para estruturas de concreto armado de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de máximos de w_r de acordo com as classes de agressividade

Classe de agressividade ambiental	Exigências relativas à fissuração
I	$w_r \leq 0,4 \text{ mm}$
II e III	$w_r \leq 0,3 \text{ mm}$
IV	$w_r \leq 0,2 \text{ mm}$

Fonte: Adaptado de NBR 6118:2014

2.5 Recuperação e Reforço

As manifestações patológicas presentes em uma construção civil podem ser decorrentes das falhas na concepção e execução, do uso da edificação ou das condições ambientais presentes. No instante que uma estrutura se encontra defasada, a mesma precisa de manutenções para manter a qualidade, segurança e vida útil.

Neste momento, a recuperação e reforço das estruturas surgem como um forte segmento de mercado da indústria da construção civil, e vem atender a necessidade de reestabelecer as condições originais das estruturas danificadas (recuperação), ou promover adequações da capacidade resistente das estruturas em função do uso (reforço). (REIS, 2001, p. 9)

Com isso, é de fundamental importância para a formação do engenheiro civil, conhecer os principais tipos de recuperação e reforço que podem ser utilizados em estruturas de concreto armado.

Segundo Grochoski e Helene (2018) a corrosão é a manifestação patológica mais frequente no concreto armado, pois a mesma diminui a resistência da estrutura devido à redução da armadura e o aumento de fissuras, além de gerar desconforto estético. Por esses motivos, é notória a relevância das recuperações para corrigir os efeitos causados pela corrosão. A Figura 2 exemplifica uma corrosão apresentada em uma laje.

Figura 2 - Corrosão em laje



Fonte: Autora (2020)

As argamassas a base de epóxi, poliéster, ou polimérica a base de cimento são alternativas para o reparo causado pela corrosão, desde que o aço e o concreto ainda não tenham sido comprometidos, conforme Helene (1992). Caso a corrosão apresente uma coloração marrom-avermelhada ou esverdeada deve-se utilizar uma camada de primer rico em zinco devido a presença de cloretos na estrutura, de acordo com Helene (1992). Além disso pode-se fazer necessária uma reconstituição da armadura dependendo do nível de corrosão que a estrutura possua.

Segundo Reis (2001) as argamassas do tipo epóxi são indicadas para reparos superficiais rápidos por aderir a vários tipos de superfícies e possuir boas propriedades físicas e mecânicas. Outra alternativa para esse tipo de recuperação são as argamassas a base de poliéster que possuem características parecidas com as de base epóxi e uma maior resistência térmica, contudo seu custo é mais elevado.

As argamassas poliméricas, por sua vez, são utilizadas para reparos em grandes áreas e profundas. Santos (2017) descreve que as argamassas mais utilizadas são aquelas industrializadas com adição de adesivo acrílico ou polímeros PVA. Entretanto, as argamassas com polímeros de PVA possuem maior restrição para uso, acarretando em um maior destaque para as argamassas com adesivo acrílico. O uso do polímero nas argamassas traz como vantagem uma redução na

permeabilidade do material e o aumento da aderência do mesmo ao concreto endurecido.

No momento em que uma estrutura não estiver apta a suportar a carga exigida, seja em decorrência do aumento da utilização ou da redução da sua capacidade, se faz preciso a intervenção do tipo reforço. Pinheiro (2018) preconiza que este deva ser executado em conjunto com as recuperações no intuito de evitar futuras manifestações patológicas. Além disso, Pinheiro (2018) justifica que a escolha de um procedimento de reforço depende das características e meios em que a estrutura se encontra, como exemplos o tipo de esforço que o elemento suporta, o tempo para a execução, as condições ambientais entre outros.

Entre os tipos mais comuns de reforço encontrados na literatura podemos citar o uso do concreto armado, as chapas e perfis metálicos, as mantas sintéticas e a protensão externa.

Furtado (2016) pormenoriza que o acréscimo de armadura na seção transversal original se faz preciso quando a área de aço presente está reduzida em 15% ou mais devido a corrosão. Resumidamente, a execução do reforço com o concreto armado consiste em primeiro escorar o entorno do elemento a ser reformado, em seguida é necessário fazer o descobrimento da armadura original para que a mesma seja desoxidada. Com a armadura original pronta, incrementa-se as barras de aço ou estribos excedentes para então ser finalizado com a aplicação do concreto, argamassa ou graute. Outras informações e especificações podem ser encontradas em Helene (1992).

Os reforços que utilizam as chapas ou perfis metálicos são geralmente configurados como situações emergenciais, devido a rapidez com que se possa executar. Reis (2001) ressalta que a união entre o material metálico e os elementos a serem reforçados necessitam de atenção especial, por esse motivo a preparação da superfície é de suma importância, podendo ser preciso a recuperação em caso da presença de fissuras.

A *Fibre-Reinforced Polymer* (FRP) ou polímero reforçado com fibras, é um material compósito criado para otimizar as propriedades mecânicas dos materiais dos quais são constituídos, segundo Oliveira (2019). Furtado (2016) define que vidro, carbono, basalto e aramida são os materiais mais comumente usados como fibras na indústria da construção civil. Os compósitos de fibra de carbono ou *Carbon-Fiber-Reinforced Polymer* (CFRP) estão sendo cada vez mais utilizados na construção civil

para o reforço de elementos estruturais, por esse motivo, os trabalhos científicos acerca desse material estão cada vez mais, trazendo novas tecnologias para o seu uso, além de acrescentar novas informações na literatura.

De acordo com Reis (2001) as CFRP possuem duas formas principais no mercado, sendo os sistemas pré-fabricados ou ainda, os sistemas curados *in loco*. Entre os motivos pelos quais se utiliza as mantas de fibra de carbono pode-se citar a alta resistência, comportamento elástico-linear, baixo coeficiente de expansão térmica, além de serem resistentes a álcalis, óxidos, raios ultravioletas e fadiga. Saraiva (2016) preconiza que sua resistência a esforços de tração pode chegar até 4.500 MPa.

O concreto protendido é um material largamente utilizado na cidade de Fortaleza (Ceará) para a construção de edifícios de múltiplos andares. Por esse motivo, a protensão externa surge como uma opção para reforço estrutural. Esta técnica consiste em ancorar cabos externamente à estrutura e então tracioná-los (PINHEIRO, 2018, p.29). A tração é realizada com o auxílio de macacos hidráulicos que se apoiam nas placas de ancoragem conforme Impacto (2020). Devido a tecnologia empregada, a protensão é eficaz no combate aos momentos fletores positivos e negativos, isso acontece por que a disposição das cordoalhas define o comportamento das forças no ato da protensão. Dentre outras vantagens a protensão externa reduz o uso de concreto, diminuindo assim a carga de peso próprio adicional e dispensa a correção prévia das deformações. Pinheiro (2018) define ainda como desvantagens a necessidade de mão de obra especializada, a exposição do reforço podendo ser suscetível a danificação através de impactos ou incêndios. Outras vantagens e desvantagens são descritas por Pinheiro (2018).

2.6 Dimensionamento da Armadura Longitudinal para Vigas de Seção T

A NBR 6118:2014 define vigas como sendo elementos lineares em que a flexão é o esforço predominante. Os elementos lineares por sua vez, são aqueles em que seu comprimento é igual ou superior a três vezes a maior dimensão da seção transversal, conhecidos também como barras. Para o dimensionamento da área de aço das vigas de seção T será utilizado o ELU. Segundo a NBR 6118:2014 os elementos devem possuir um comportamento dúctil, ou seja, o aço deve ser dimensionado para o estado plástico ou de ruptura, encontrando-se nos domínios 2

ou 3. Assim sendo, a norma preconiza os limites que a linha neutra deve obedecer no ELU, para concretos de f_{ck} até 50MPa, como sendo:

$$x/d \leq 0,45 \quad (9)$$

onde:

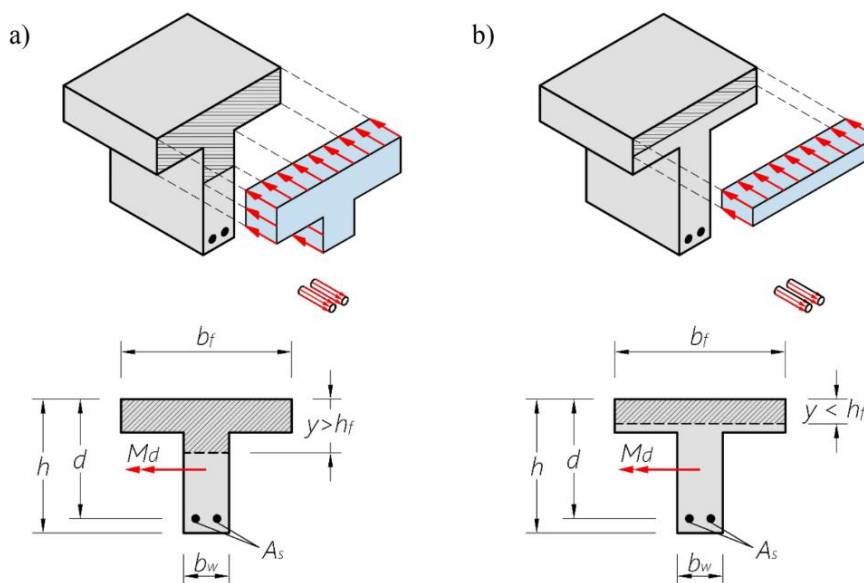
x é a profundidade da linha neutra

d é a distância da fibra mais comprimida até o centro da armadura, conhecida também por altura útil. A relação x/d é denominada posição relativa da linha neutra (k_x).

A substituição do diagrama parabólico-retangular de tensões do concreto, para um diagrama retangular simplificado é um recurso permitido pela NBR 6118:2014. Nesse caso, a tensão de compressão é constante de valor igual a $0,85f_{cd}$, e está distribuída em 80% da linha neutra.

Bezerra (2017) define que o dimensionamento de uma seção T depende da posição da linha neutra fictícia ($y=0,8x$). Se y estiver dentro da mesa a seção é considerada um “falso T” e é dimensionada como uma seção retangular de largura b_f e altura h_t . Caso contrário o dimensionamento considera toda a mesa e a parte da alma que está sofrendo compressão. A Figura 3 ilustra os dois casos explanados.

Figura 3 - Classificação da seção como a) T e b) falso T



Fonte: Bezerra (2017)

A altura útil de comparação (d_0) é um valor teórico empregado por Clímaco (2016) como artifício para classificar a seção T, onde ele considera $y=h_f$. Para o cálculo de d_0 é utilizado a expressão

$$d_0 = \frac{M_d}{0,85f_{cd}b_f h_f} + \frac{h_f}{2} \quad (10)$$

onde M_d é o momento fletor de cálculo.

2.6.1 Para $d \geq d_0$

Nesse caso a seção é considerada retangular, seu momento fletor adimensional (k_{Md}) e a posição relativa da linha neutra (k_x) podem ser calculados através das fórmulas

$$k_{Md} = \frac{M_d}{d^2 f_{cd} b_f} \quad (11)$$

$$k_x = 1,25 - 1,9174\sqrt{0,45 - k_{Md}} \quad (12)$$

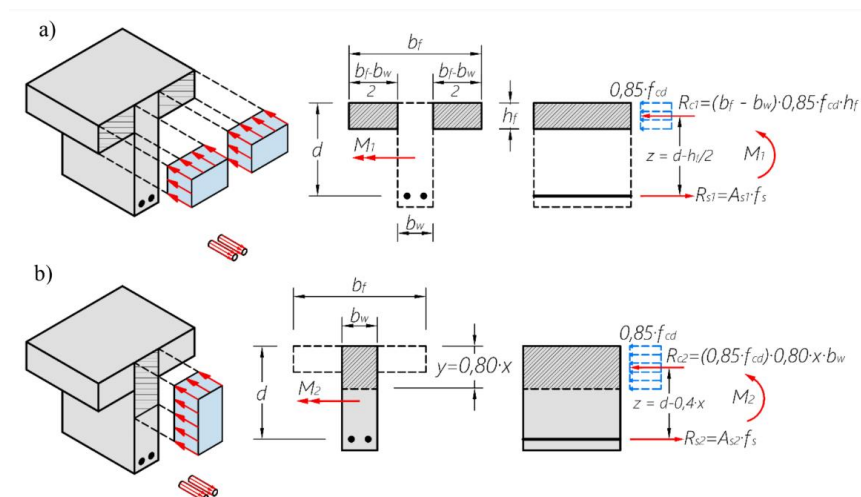
Como a ruptura deverá ser precisamente dúctil, a deformação da armadura supera a deformação de escoamento de cálculo do aço (f_{yd}) conforme expresso pela NBR 6118:2014. Portanto a área de aço necessária (A_s) pode ser definida como

$$A_s = \frac{M_d}{(1 - 0,4k_x)d f_{yd}} \quad (13)$$

2.6.2 Para $d < d_0$

Nesse caso a linha neutra se encontra na alma, com isso, considera-se a seção T. Para efeitos de cálculo é adequado dividir o momento a ser absorvido pela mesa (M_1) do momento absorvido pela alma (M_2) de acordo com a Figura 4.

Figura 4 - a) Momento resistido pelas abas da mesa e b) Momento resistido pela alma



Fonte: Bezerra (2017)

A equação 14 define o valor do momento absorvido pelas abas da mesa considerando o somatório dos momentos em torno do centro geométrico da armadura

$$M_1 = 0,85f_{cd}h_f(b_f - b_w)(d - 0,5h_f) \quad (14)$$

Como o somatório dos M_1 e M_2 deve resultar no momento fletor de cálculo a ser absorvido pela seção temos

$$M_2 = M_d - M_1 \quad (15)$$

$$k_{md} = \frac{M_2}{d^2 f_{cd} b_f} \quad (16)$$

$$k_x = 1,25 - 1,9174\sqrt{0,45 - k_{Md}} \quad (17)$$

A armadura necessária pra seção T é definida como

$$A_s = \frac{M_1}{(d - 0,5h_f)f_{yd}} + \frac{M_2}{(1 - 0,4k_x)d f_{yd}} \quad (18)$$

2.6.3 Armadura Mínima, Máxima e de Pele

A fim de evitar que a viga possa trabalhar no domínio 1, onde a ruptura é frágil, a NBR 6118:2014 ressalta que a seção deverá possuir uma armadura mínima, que trabalhará absorvendo os esforços de tração do momento fletor mínimo. A área de aço mínima ($A_{s,min}$) é definida através da expressão

$$A_{s,min} = \rho_{min} A_c \quad (19)$$

onde:

A_c é a área do concreto

ρ_{min} é a taxa de armadura em %

Araújo (2014) define a taxa de armadura como

$$\rho_{min} = \frac{0,0784 f_{ck}^{2/3}}{f_{yd}} \geq 0,15\% \quad (20)$$

A Tabela 10 descreve alguns valores encontrados para ρ_{min} de acordo com f_{ck} e f_{yd} .

Tabela 10 - Taxas mínimas da armadura de flexão ρ_{min} (%)

Aço	f_{ck} (MPa)						
	20	25	30	35	40	45	50
CA-50	0,15	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25
CA-60	0,15	0,15	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20

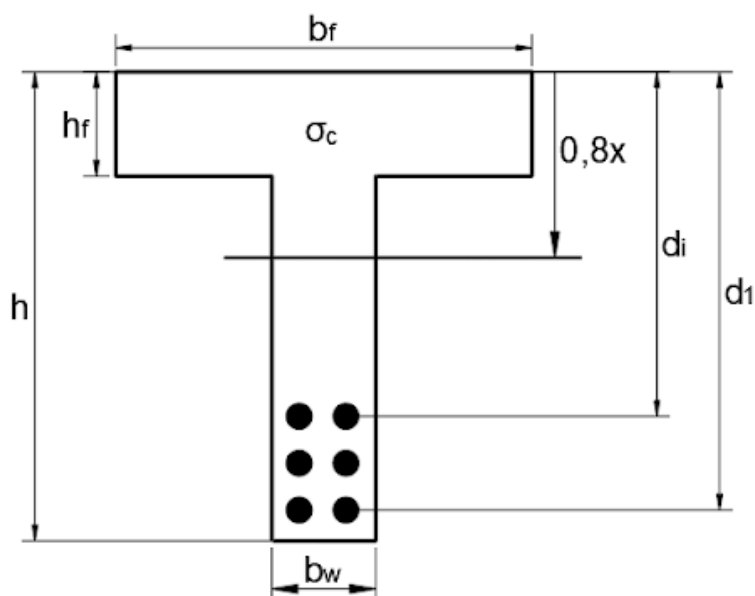
Fonte: Araújo (2014)

A NBR 6118:2014 pormenoriza que o somatório das áreas das armaduras de compressão e tração não deve exceder a 4% da área de concreto. Para vigas com altura superior a 60cm a norma prescreve uma armadura de pele igual a 0,10% $A_{c,alma}$ localizada em cada face da viga, com espaçamento menor ou igual a 20cm, composta por barras do tipo CA-50 ou CA-60 e até 5cm²/m por face.

2.7 Verificação da Capacidade Resistente de Vigas

A verificação da capacidade resistente das vigas é uma etapa de suma importância no processo de manutenções ou reformas, pois ela analisa se a viga está suprindo devidamente com os esforços solicitantes, definindo a necessidade ou não de reforço no elemento estrutural. O presente trabalho aborda a verificação do momento fletor de cálculo, conforme Araújo (2014), para uma viga de seção T com múltiplas camadas de armadura e f_{ck} até 50MPa como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Seção T com múltiplas camadas de armadura



Fonte: Autora (2020)

Devido as múltiplas camadas, o cálculo para a profundidade da linha neutra necessita de um processo iterativo.

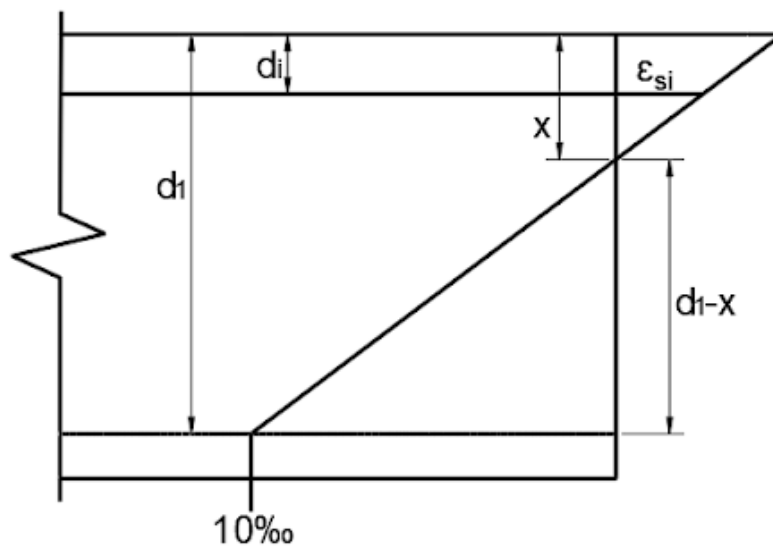
Araújo (2014) considera para essa formulação que todas as barras estejam sofrendo compressão. Logo, se uma barra estiver sofrendo tração, sua deformação

será negativa, assim como sua tensão, assegurando o sentido correto das forças nas camadas de aço.

Analisando a Figura 1, pode-se observar que no domínio 2 a deformação do aço é estabelecida em 10‰, enquanto nos domínios 3 e 4 a deformação do concreto é ϵ_{cu} . Como $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ temos $\epsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$. Devido a essa distinção é necessário verificar para os dois casos.

a) Domínio 2

Figura 6 - Domínio 2



Fonte: Autora (2020)

Observando a Figura 6 tem-se

$$0 \leq x \leq \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + 10\text{‰}} \right) d_1 \quad (21)$$

Utilizando semelhança de triângulos, a deformação da camada i de armadura (ϵ_{si}) pode ser definida através da expressão

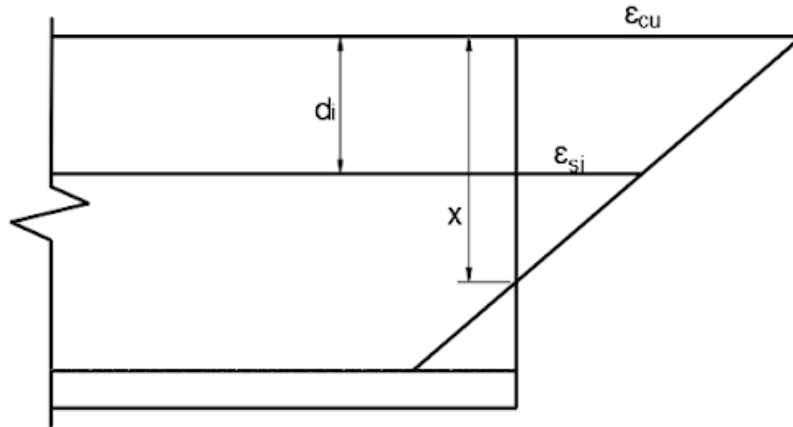
$$\epsilon_{si} = 10\text{‰} \left(\frac{x - d_i}{d_1 - x} \right) \quad (22)$$

b) Domínio 3 e 4

O intervalo que está contida a profundidade da linha neutra é definido como

$$\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + 10\%} \right) d_1 < x \leq d_1 \quad (23)$$

Figura 7 - Domínios 3 e 4



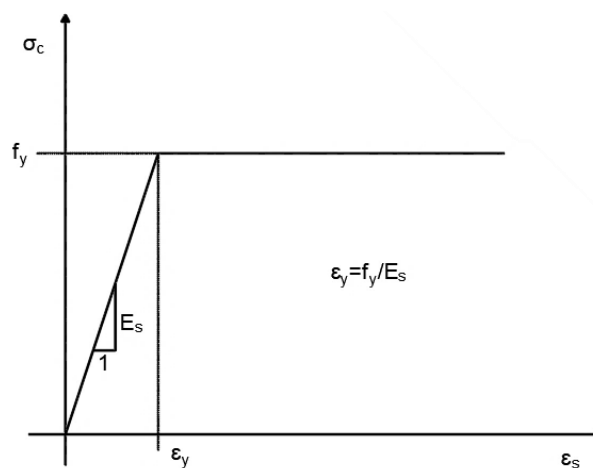
Fonte: Autora (2020)

Conforme a Figura 7 tem-se

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{x - d_i}{x} \right) \quad (24)$$

Segundo Araújo (2014), após a determinação da deformação que cada camada de armadura sofre, encontra-se a tensão σ_{si} que cada camada está sujeita através da utilização do diagrama tensão-deformação do aço ilustrado na Figura 8 e as expressões 25 e 26.

Figura 8 - Diagrama de tensão-deformação do aço



Fonte: Autora (2020)

Para $\varepsilon_{si} \geq \varepsilon_y$ temos

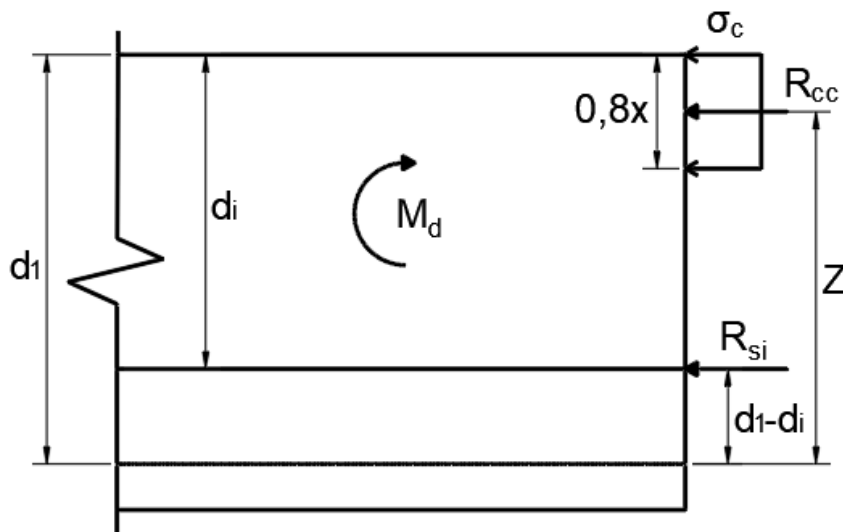
$$\sigma_{si} = f_{yd} \quad (25)$$

Para $\varepsilon_{si} < \varepsilon_y$ temos

$$\sigma_{si} = E_s \varepsilon_{cu} \left(\frac{d - x}{x} \right) \quad (26)$$

A Figura 9 indica as forças de compressão e tração exercidas na seção de concreto e nas camadas de armadura.

Figura 9 - Resultante das tensões na seção



Fonte: Autora (2020)

Para encontrar a profundidade da linha neutra, utiliza-se a função

$$f(x) = R_{cc} + \sum_{i=1}^n R_{si} = 0 \quad (27)$$

correspondente ao equilíbrio de forças, onde a resultante de compressão, depende da posição da linha neutra conforme as equações

$$R_{cc} = 0,8x b_f \sigma_c \text{ para } 0,8x \leq h_f \text{ (Falso T)} \quad (28)$$

$$R_{cc} = [b_f h_f + b_w (0,8x - h_f)] \sigma_c \text{ para } 0,8x > h_f \text{ (Seção T)} \quad (29)$$

sendo $\sigma_c = 0,85 f_{cd}$

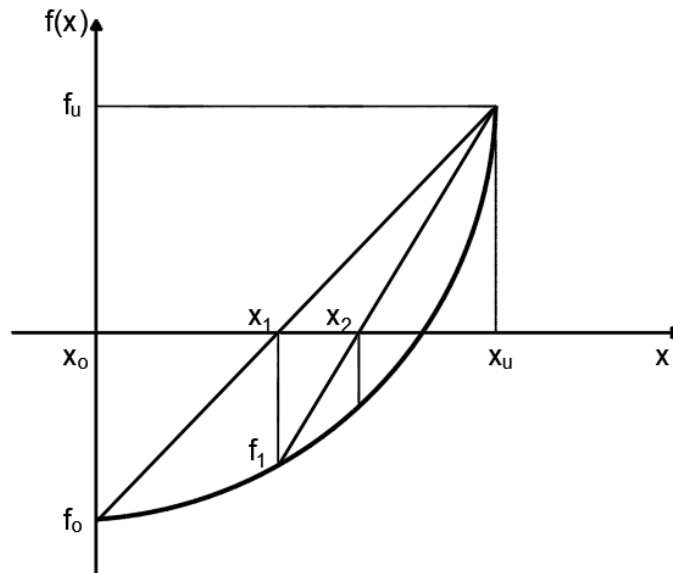
e a força na camada genérica da armadura é determinada pela equação

$$R_{si} = A_{si} \sigma_{si} \quad (30)$$

Conforme Araújo (2014), para a resolução da equação 27 utiliza-se o processo iterativo da bissecante, ilustrado na Figura 10, e os limites de intervalos

como sendo $x_0=0$ e $x_u=d_1$, por consequência, os valores da função nos extremos são $f_0=f(x_0)$ e $f_u=f(x_u)$.

Figura 10 - Método da bissecante



Fonte: Autora (2020)

A aproximação da raiz (x_i) da função $f(x)$ é o ponto de interseção entre a reta que passa pelos pontos (x_0, f_0) e (x_u, f_u) com o eixo das abscissas. Esse valor é calculado através da equação

$$x_i = \frac{x_0 f_u - x_u f_0}{f_u - f_0} \quad (31)$$

Posteriormente, calcula-se $f_i=f(x_i)$ e verifica se $|f_i|<tol$, onde tol é uma tolerância definida e próxima de 0, em caso positivo tem-se que a convergência foi alcançada e a raiz é x_i . Caso contrário, é necessário reduzir o intervalo e iterar novamente, para isso, analisa-se o produto $p_i=f_0 f_i$. Se $p_i>0$ adota-se $x_0=x_i$ e $f_0=f_i$. Se $p_i<0$ faz-se $x_u=x_i$ e $f_u=f_i$. Repete-se o laço a partir da equação (31) até que a convergência seja atendida.

Encontrada a profundidade da linha neutra, Araújo (2014) define o momento fletor de cálculo através da equação de equilíbrio

$$M_d = R_{cc}Z + \sum_{i=1}^n A_{si} \sigma_{si} (d_1 - d_i) \quad (32)$$

onde $R_{cc}Z$ é definido pelas equações

$$R_{cc}Z = 0,8xb_f\sigma_c(d_1 - 0,5 * 0,8x) \text{ para } 0,8x \leq h_f \text{ (Falso T)} \quad (33)$$

$$R_{cc}Z = \{b_fh_f(d_1 - 0,5h_f) + b_w(0,8x - h_f)[d_1 - 0,5(0,8x + h_f)]\}\sigma_c \quad (34)$$

para $0,8x > h_f$ (Seção T)

3 METODOLOGIA

O processo metodológico utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho é constituído de etapas, onde primeiramente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre vigas de seção retangular e T, em livros, normas, artigos científicos e dissertações, para a caracterização quanto a materiais e especificações geométricas e mecânicas.

Após esta fase, foi desenvolvido um estudo sobre o dimensionamento de vigas, em especial a viga com seção T, por abranger também a seção retangular. Foi feita a implementação do roteiro da ferramenta computacional em linguagem Python. Em seguida foi realizado a validação da ferramenta através de exemplos da literatura. Além disso, foi feito estudos paramétricos de exemplos práticos.

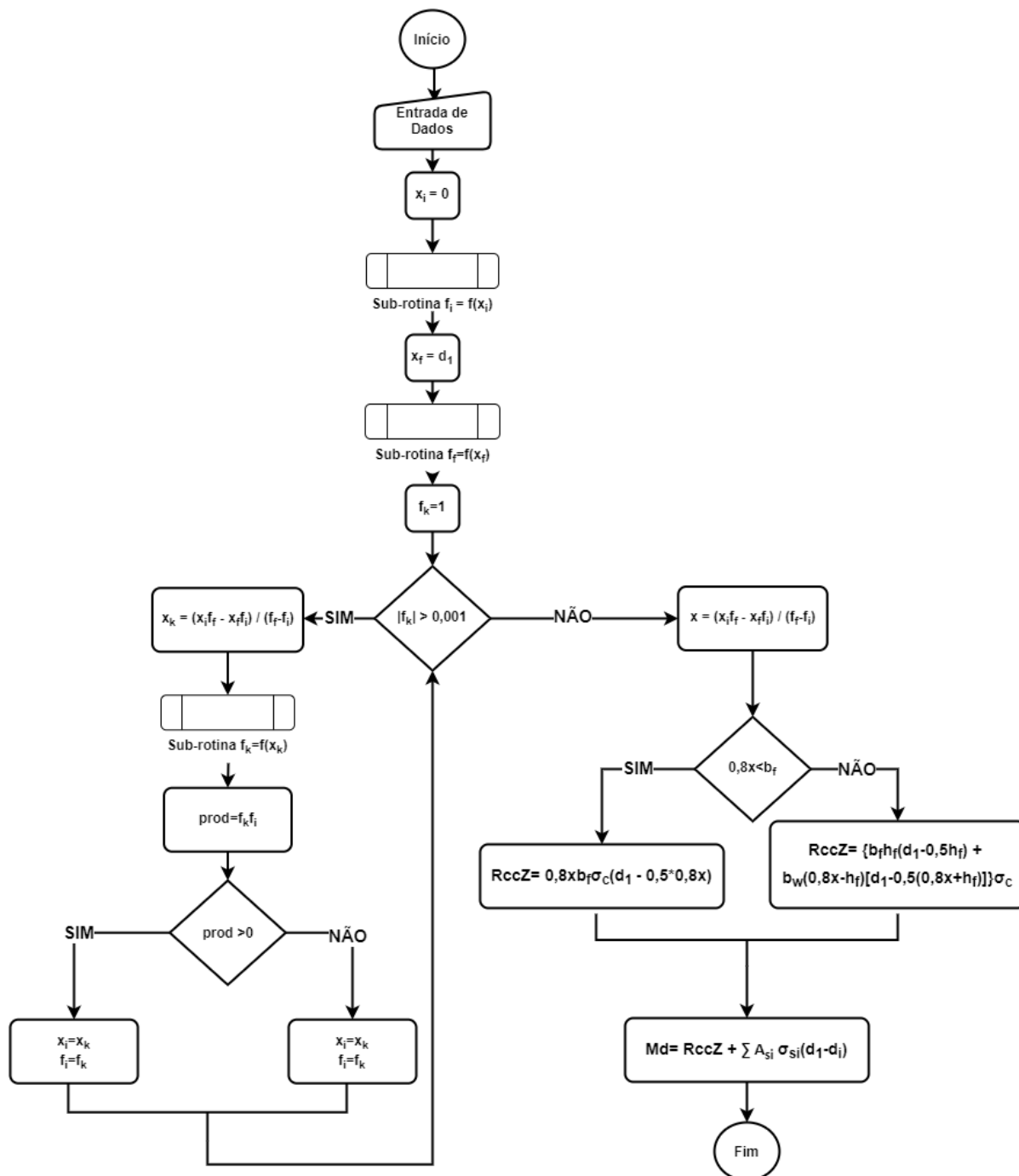
3.1 Roteiro de cálculo

O roteiro de cálculo a ser utilizado pela ferramenta foi baseado na literatura de Araújo (2014) sobre a verificação da capacidade resistente de vigas, desenvolvendo um algoritmo para o cálculo do momento fletor de ruína (M_d). Os dados foram divididos em dois grupos: Características dos Materiais, onde o algoritmo recebe as propriedades físicas (f_{ck} e o tipo de aço), e Características da Seção, composto pelo tipo da seção (Retangular ou T), dimensões (b para Retangular, b_f , h_f e b_w para T), área (A_{si}) e altura útil (d_i) de cada camada de aço inclusive seu nível de corrosão em percentagem (%).

Além disso, foi feito um estudo para os possíveis erros que o programa possa apresentar, em caso de não conformidade com a norma ou dados inválidos, esses erros foram tratados a fim de garantir a funcionalidade da ferramenta.

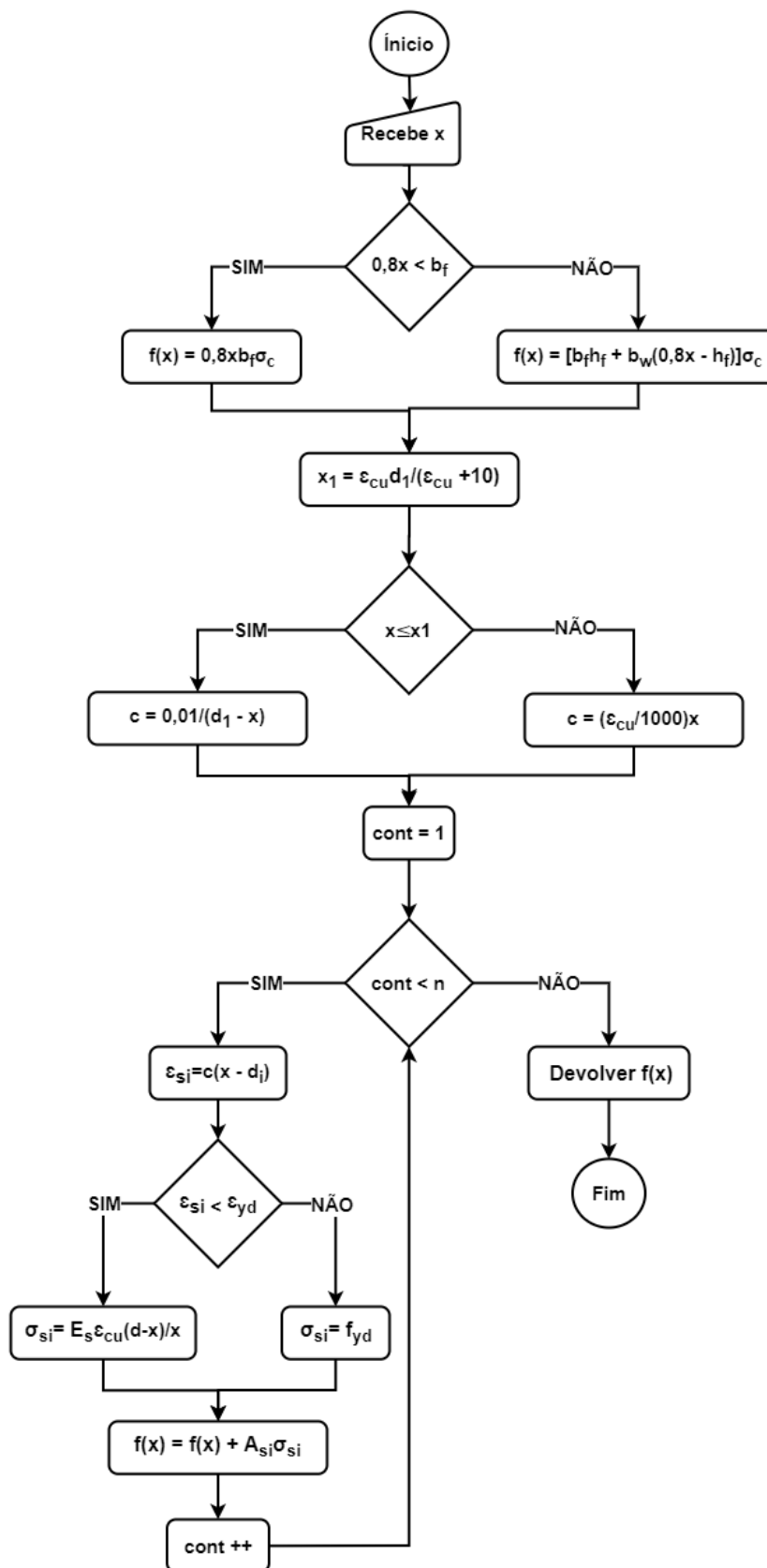
Os fluxogramas a seguir foram baseados no roteiro de cálculo, onde a Figura 11 representa o fluxo de execução principal (*main*) do programa. A Figura 12 representa uma rotina secundária que será utilizada constantemente pela *main* e emprega o método da bissecante supracitado para o cálculo da função $f(x)$. As divisões do fluxo de código são determinadas pela classificação quanto a posição da linha neutra, tanto para definir seção T ou Retangular quanto para determinar se o aço se encontra no domínio 2 ou domínios 3 e 4.

Figura 11 - Fluxograma principal (main)



Fonte: Autora (2020)

Figura 12 - Fluxograma da rotina secundária



3.2 Linguagem de programação

A linguagem de programação escolhida foi Python, por ser uma linguagem de fácil aprendizado, simples, que está bem inserida no mercado de trabalho e possui computação gráfica, além de ser suportada por inúmeras plataformas.

Para a elaboração das telas, foi utilizada a biblioteca GTK do Python para a criação da interface gráfica, que são as pontes entre o usuário e o programa, por isso foram produzidas para serem intuitivas e claras. Além disso, a biblioteca ReportLab foi utilizada para a criação do arquivo de formato PDF (*Portable Document Format* - Formato Portátil de Documento) referente ao relatório do processo de verificação.

Os campos de preenchimento dos dados a serem coletados apresentam a unidade utilizada pelo código, para que seja feita um preenchimento correto por parte do usuário. Em caso de erro nas informações um aviso é exposto indicando o local do erro e como este deve ser solucionado.

O programa utilizado para o desenvolvimento da ferramenta foi uma IDE (*Integrated Development Environment*/ Ambiente de Desenvolvimento Integrado) por possuir editor, compilador e depurador. O editor é o local onde o programador utiliza para a escrita do código. O compilador é responsável por rodar o algoritmo enquanto o depurador identifica os possíveis erros de código. A IDE Pycharm, desenvolvida pela empresa JetBrains, foi definida por dispor de um depurador gráfico, uma interface limpa e personalizável e sugestões inteligentes de código, facilitando o acesso para novos usuários.

3.3 Validação

A fim de validar a ferramenta, foram utilizadas duas tabelas desenvolvidas e disponibilizadas pelo professor Me. Bergson Matias no ambiente *Microsoft Excel*®. As planilhas calculam a linha neutra e o momento por meio da função “Atingir Meta”, que aproxima a cédula da função $f(x)=0$ através variação do valor da cédula da linha neutra. A Figura 13 e Figura 14 representam as tabelas para viga de seção retangular e T, respectivamente.

Figura 13 - Planilha de Verificação Seção Retangular

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Entradas					Roteiro de Cálculo				Resultados		
2	b (m)	Camada i	Asi (m²)	di (m)	Corrosão (%)	esi	ssi	Rsi	Rcc	Md (kNcm)	x (m)	Domínio
3	0,15	1	6,03E-04	0,36	0%	-0,00238	-434782,6	-2,62E+02	312,321	12914 kNcm	0,2143	3/4
4	Fck (MPa)	2	4,02E-04	0,32	0%	-0,00173	-345080,2	-1,39E+02	z			
5	20	3	4,02E-04	0,28	0%	-0,00107	-214445,2	-8,62E+01	0,27426			
6	Aço (MPa)	4	4,02E-04	0,04	0%	0,00285	434782,61	1,75E+02	f(x)			
7	500								0,00			
8												

Fonte: Autora (2020)

Figura 14 - Planilha de Verificação Seção T

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Entradas					Roteiro de Cálculo				Resultados		
2	bw (m)	Camada i	Asi (m²)	di (m)	Corrosão (%)	esi	ssi	Rsi	Rcc	Md (kNcm)	x (m)	Domínio
3	0,15	1	1,12E-03	0,65	0%	-0,01	-434783	-4,88E+02	488,261	29992 kNcm	0,0894	2
4	bf (m)								z			
5	0,45								0,61426			
6	hf (m)								f(x)			
7	0,1								0,00			
8	Fck (MPa)											
9	25											
10	Aço (MPa)											
11	500											

Fonte: Autora (2020)

3.4 Exemplos de aplicação

A seguir será apresentado os 7 exemplos de aplicação utilizados para efeitos de validação da ferramenta. Desses são 3 para vigas de seção retangular e 4 para vigas de seção T.

3.4.1 Ex. 1 – Viga Retangular com Armadura Dupla

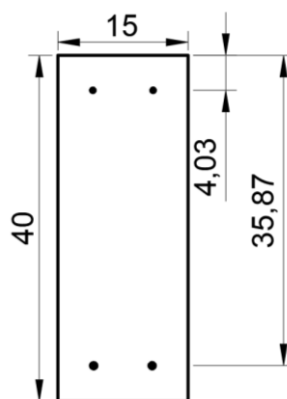
Neste exemplo foi considerada uma viga de seção retangular com 15cm de largura e armaduras (positiva e negativa) que não sofreram com efeitos da corrosão. Foi utilizado o concreto de 20MPa e aço CA-50. Além disso foi considerado um cobrimento de 3cm e bitola de 6,3mm para estribos. As camadas de aço estão descritas na Tabela 11 e a Figura 15 ilustra a seção.

Tabela 11 - Exemplo 1: Camadas de Aço

Camada de Aço	Área de Aço (cm²)	Altura Útil (cm)
d1 (2Ø10)	1,57 cm²	35,87 cm
d2 (2Ø8)	1,00 cm²	4,03 cm

Fonte: Autora (2020)

Figura 15 - Exemplo 1: Seção



Fonte: Autora (2020)

3.4.2 Ex. 2 – Viga Retangular com Múltiplas Camadas de Aço

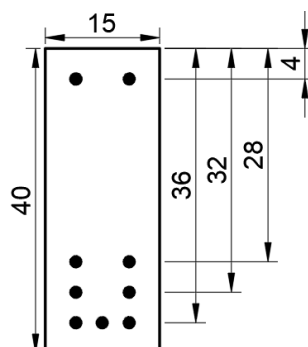
Este exemplo foi retirado da literatura de Araújo (2014) e é similar ao anterior onde também foi considerada uma viga de seção retangular com 15cm de largura. Todavia, a viga apresenta múltiplas camadas de armadura que não sofreram com efeitos da corrosão. O concreto utilizado foi de 20MPa e aço CA-50. As camadas de aço estão descritas na Tabela 12 e a Figura 16 ilustra a seção.

Tabela 12 - Exemplo 2: Camadas de Aço

Camada de Aço	Área de Aço (cm ²)	Altura Útil (cm)
d1 (3Ø16)	6,03 cm ²	36 cm
d2 (2Ø16)	4,02 cm ²	32 cm
d3 (2Ø16)	4,02 cm ²	28 cm
d4 (2Ø16)	4,02 cm ²	4 cm

Fonte: Autora (2020)

Figura 16 - Exemplo 2: Seção



Fonte: Autora (2020)

3.4.3 Ex. 3 – Viga Retangular com Múltiplas Camadas de Aço com Perda de Seção

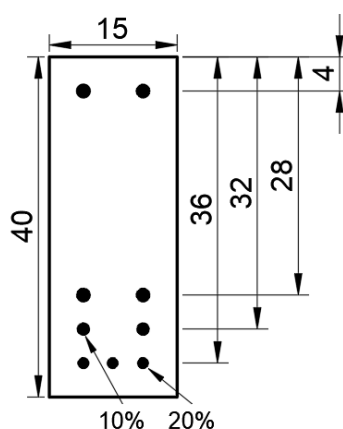
Este exemplo possui as mesmas características do exemplo anterior, porém foi considerado que as armaduras sofrem corrosão variando entre 0% e 20%, conforme o arranjo. As camadas de aço e suas respectivas corrosões estão descritas na Tabela 13 e a Figura 17 ilustra a seção.

Tabela 13 - Exemplo 3: Camadas de Aço

Camada de Aço	Área de Aço (cm ²)	Altura Útil (cm)	Corrosão
d1 (3Ø16)	6,03 cm ²	36 cm	20%
d2 (2Ø16)	4,02 cm ²	32 cm	10%
d3 (2Ø16)	4,02 cm ²	28 cm	0%
d4 (2Ø16)	4,02 cm ²	4 cm	0%

Fonte: Autora (2020)

Figura 17 - Exemplo 3: Seção

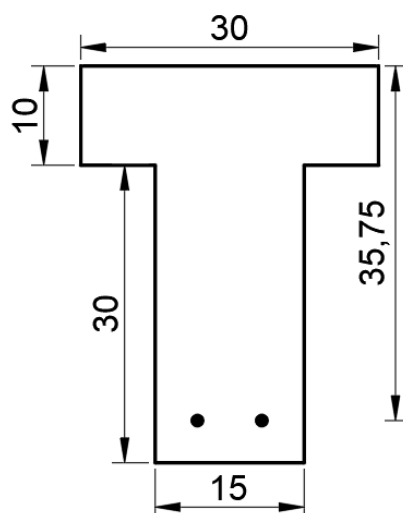


Fonte: Autora (2020)

3.4.4 Ex.4 – Falso T com Armadura Simples

Neste exemplo a viga possui seção T, cobrimento de 3cm, estribos de 6,3mm de bitola e uma camada de aço com 2 barras de 12,5mm totalizando uma área de 2,5 cm² com altura útil de 35,75 cm. Entretanto a viga se comporta como uma seção retangular devido a sua pequena armadura como será visto no próximo capítulo. O concreto utilizado foi o de 25MPa e o aço CA-50. A Figura 18 apresenta as características da seção.

Figura 18 - Exemplo 4: Seção

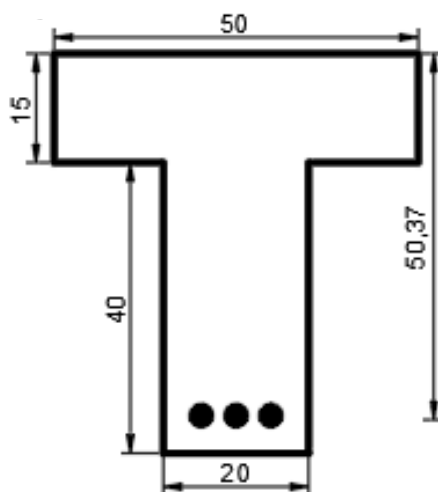


Fonte: Autora (2020)

3.4.5 Ex. 5 – Viga T com Armadura Simples

Semelhante ao exemplo anterior a viga possui seção T e os mesmos materiais (concreto de 25MPa e aço CA-50). Dispõe de uma camada de aço com 3 barras de 32mm totalizando uma área de aço de 24 cm² com altura útil de 50,37 cm. Possui um cobrimento de 3cm e estribos com diâmetro de 6,3mm. A Figura 19 ilustra as demais características da seção.

Figura 19 - Exemplo 5: Seção



Fonte: Autora (2020)

3.4.6 Ex. 6 – Viga T com Múltiplas Camadas de Aço

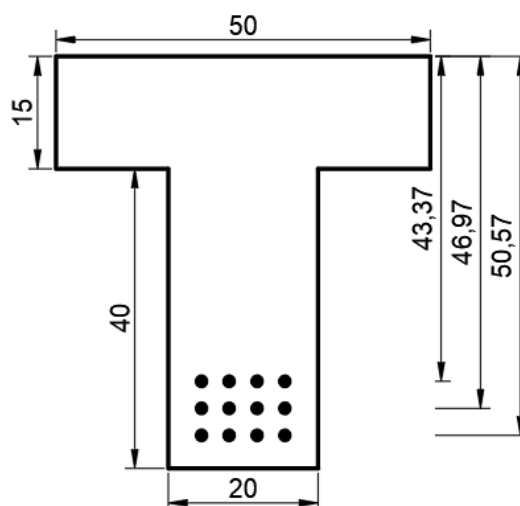
Neste exemplo a viga de seção T possui múltiplas camadas de aço representadas na Tabela 14. A Figura 20 ilustra a seção que utiliza concreto com 25Mpa, aço CA-50, cobrimento de 3cm e estribos de 6,3mm de diâmetro.

Tabela 14 - Exemplo 6: Camadas de Aço

Camada de Aço	Área de Aço (cm ²)	Altura Útil (cm)
d1 (4Ø16)	8,00 cm ²	50,57 cm
d2 (4Ø16)	8,00 cm ²	46,97 cm
d3 (4Ø16)	8,00 cm ²	43,37 cm

Fonte: Autora (2020)

Figura 20 - Exemplo 6: Seção

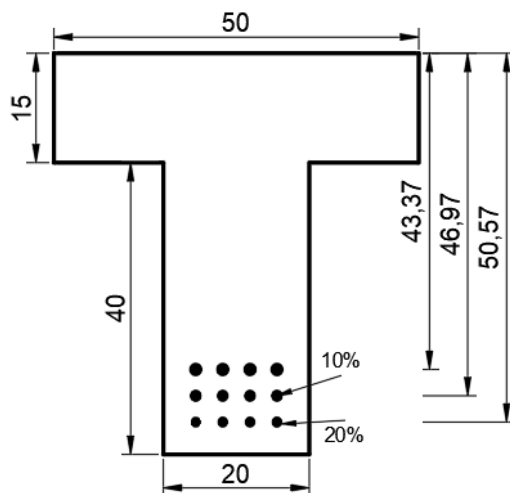


Fonte: Autora (2020)

3.4.7 Ex. 7 – Viga T com Múltiplas Camadas de Aço com Perda de Seção

Neste último a viga possui as mesmas características da seção e dos materiais que o exemplo anterior, contudo suas armaduras sofrem o processo de corrosão entre 0% e 20% conforme sua distribuição como apresentado na Figura 21. A Tabela 15 apresenta as camadas de aço.

Figura 21 - Exemplo 7: Seção



Fonte: Autora (2020)

Tabela 15 - Exemplo 7: Camadas de Aço

Camada de Aço	Área de Aço (cm ²)	Altura Útil (cm)	Corrosão
d1 (4Ø16)	8,00 cm ²	50,57 cm	20%
d2 (4Ø16)	8,00 cm ²	46,97 cm	10%
d3 (4Ø16)	8,00 cm ²	43,37 cm	0%

Fonte: Autora (2020)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é destinado a expor a ferramenta desenvolvida no presente trabalho, a B-Strength, e a análise dos resultados encontrados para os exemplos descritos anteriormente.

4.1 A ferramenta computacional: B-Strength

A *B-Strength*, é uma ferramenta que funciona como outros programas para o sistema operacional *Windows*®. Ao instalar, automaticamente será gerado um atalho na área de trabalho com o ícone ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Ícone do B-Strength



Fonte: Autora (2020)

A Figura 23 apresenta a tela inicial após a abertura do programa, onde o usuário poderá escolher entre verificar uma viga de seção Retangular ou T.

Figura 23 - Tela Inicial



Fonte: Autora (2020)

As seguintes telas são de entradas de dados e resultados conforme a escolha. A Figura 24 e a Figura 25 correspondem as telas de seção retangular e seção T, respectivamente. O usuário pode inserir as características da seção, como a largura da seção (para viga retangular) ou largura da alma, largura da mesa e altura da mesa (para viga T), destacado nas imagens.

Figura 24 - Tela da Seção Retangular

Fonte: Autora (2020)

Figura 25 - Tela da Seção T

Fonte: Autora (2020)

Para adicionar as camadas de aço, o usuário deve inserir a área de aço, nível de corrosão e altura útil correspondente a cada camada e em seguida clicar no botão “Adicionar Camada de Aço”. A camada de aço adicionada aparece tabela destacada na Figura 26. Caso o usuário queira mudar as camadas de aço pode clicar no botão “Limpar Camadas de Aço” e inseri-las novamente.

Figura 26 - Camadas de Aço

Fonte: Autora (2020)

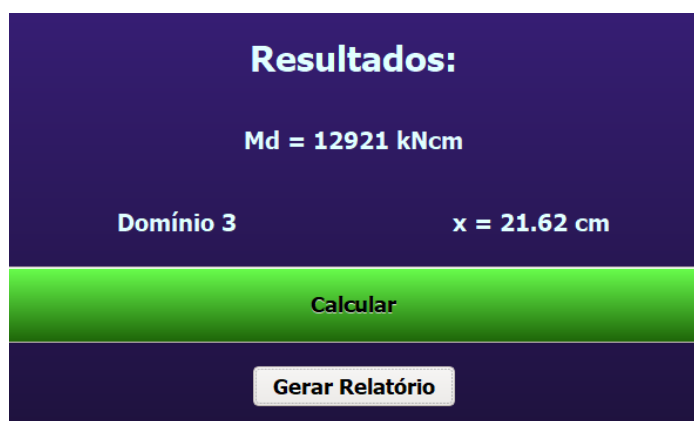
Em “Características dos Materiais” o usuário pode inserir a resistência do concreto e escolher entre o aço CA-50 e CA-60 como apresentado pela Figura 27.

Figura 27 - Características dos Materiais

Fonte: Autora (2020)

Os resultados são apresentados após clicar no botão “Calcular”. A Figura 28 mostra um exemplo de resultado.

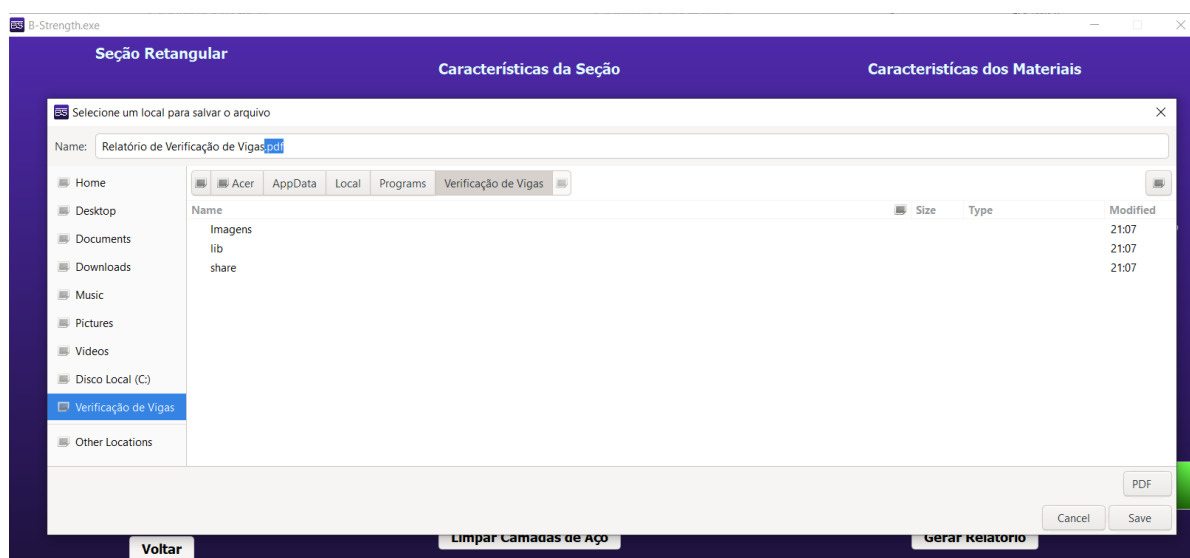
Figura 28 - Visualização de Resultados



Fonte: Autora (2020)

Além disso, o usuário pode salvar as entradas e resultados da verificação através do botão “Gerar Relatório”, que irá abrir uma janela, ilustrada pela Figura 29, para escolher o local e o nome do arquivo que será salvo.

Figura 29 - Janela de Salvar



Fonte: Autora (2020)

O relatório possui formato PDF e a Figura 30 exhibe o layout do arquivo gerado.

Figura 30 - Layout do Relatório

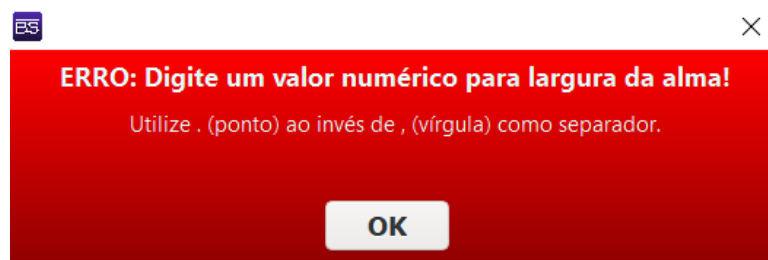
Verificação do Momento Resistente da Viga

Características da Seção				Características dos Materiais	
Largura: 15.0				Fck (MPa): 20.0	
Camada de Aço	Área de Aço	Altura Útil	Corrosão	Aço: CA-50.0	
d1	6.0	36.0	0%	Resultados Md = 12921 kNcm x = 21.62 cm Domínio 3	
d2	4.0	32.0	0%		
d3	4.0	28.0	0%		
d4	4.0	4.0	0%		

Fonte: Autora (2020)

Todos os dados de entrada devem ser numéricos e utilizar “.” (ponto) como separador de casas decimais, em caso de discordância desse formato o programa irá abrir uma janela com uma mensagem de erro como é demonstrado pela Figura 31. Através do botão “Voltar” o usuário pode retornar a tela inicial.

Figura 31 - Mensagem de Erro

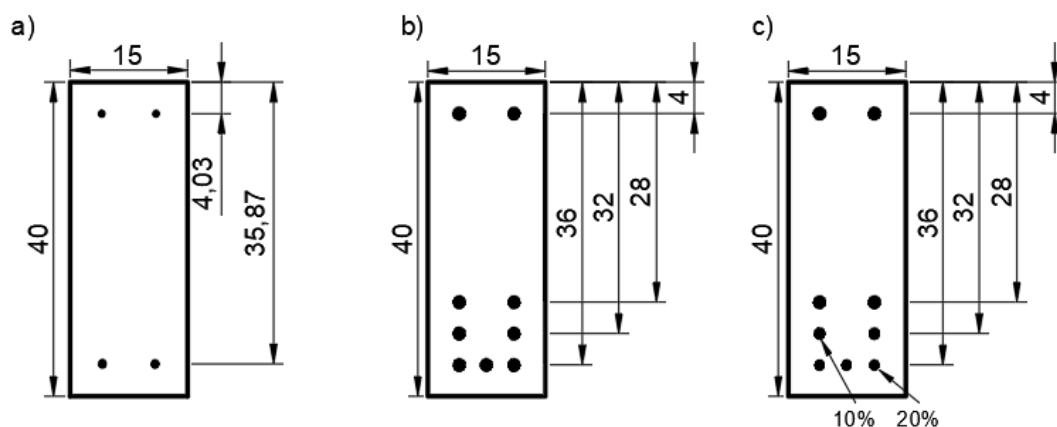


Fonte: Autora (2020)

4.2 Seção Retangular

Os problemas propostos para as seções retangulares (Figura 32), foram calculados pela ferramenta B-Strength e a planilha do *Microsoft Excel*®, seus resultados foram comparados a fim de obter uma validação do programa desenvolvido. Os valores encontrados por ambas, estão explanados na Tabela 16 a seguir.

Figura 32 - Seções de Vigas Retangulares a) Ex.1 – Viga Retangular com Armadura Dupla b) Ex. 2 – Viga Retangular com Múltiplas Camadas de Aço c) Ex. 3 – Viga Retangular com Múltiplas Camadas de Aço com Perda de Seção



Fonte: Autora (2020)

Tabela 16 – Resultados para Seção Retangular

Exemplos	B-Strength			Planilha		
	Md (kNcm)	x (cm)	Domínio	Md (kNcm)	x (cm)	Domínio
Exemplo 1	2319	4,48	2	2311	4,48	2
Exemplo 2	12921	21,62	3	12922	21,62	3
Exemplo 3	12338	20,35	3	12339	20,35	3

Fonte: Autora (2020)

Os valores encontrados pela ferramenta e os resultados obtidos pelas planilhas para o parâmetro x são idênticos. Contudo o mesmo não ocorre para M_d , então, para efeitos comparativos, a divergência entre os resultados foi calculada e é descrita na Tabela 17 a seguir.

Tabela 17 – Divergência para as Seções Retangulares

Exemplos	Divergência M_d (%)
Ex.1 – 2 camadas	0,345
Ex. 2 – 4 camadas	0,0077
Ex.3 – 4 camadas (com corrosão)	0,0081

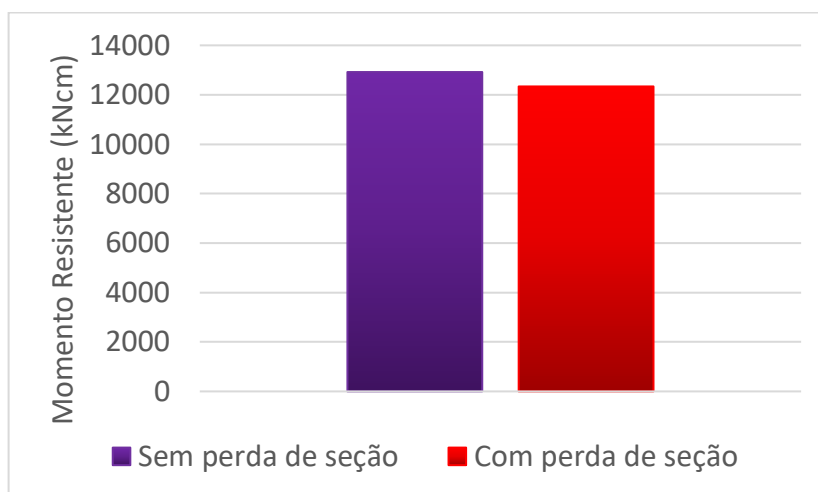
Fonte: Autora (2020)

As taxas de divergência encontradas são inferiores a 0,4%. Assim, a ferramenta pode ser considerada validada para as seções retangulares.

Pela Tabela 16 – Resultados pode-se também comparar os efeitos da corrosão na capacidade resistente da viga. O momento resistente foi reduzido em 4,5% e a linha neutra em 5,9% considerando as corrosões de 20% e 10% encontradas no Exemplo 3, quando comparado com os valores obtidos pelo Exemplo 2 que possui as mesmas características para a seção.

Observando a Figura 33 pode-se perceber que os momentos encontrados em cada exemplo são próximos e que a perda de seção por corrosão não afetou de forma significativa a capacidade resistente das vigas.

Figura 33 – Momento Resistente X Perda de Seção para as Vigas Retangulares

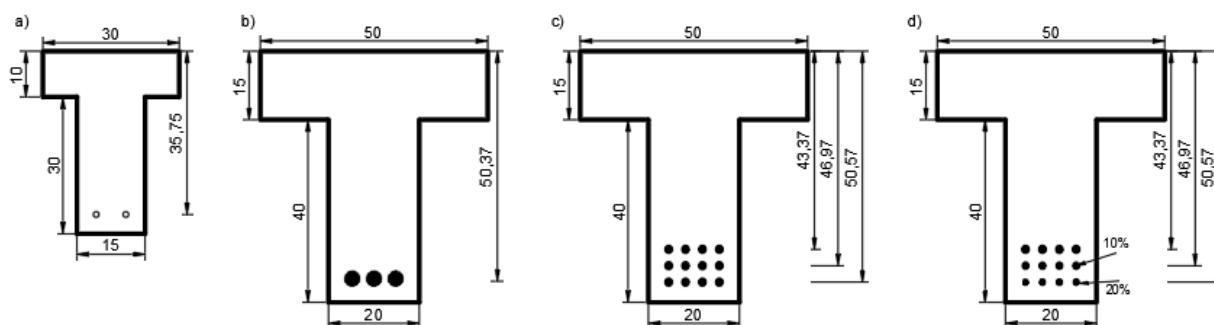


Fonte: Autora (2020)

4.3 Seção T

Os exemplos de aplicação para seções T (Figura 34), foram resolvidos pela ferramenta B-Strength e pela planilha do *Microsoft Excel*®, e seus resultados estão explanados na Tabela 18.

Figura 34 - Seções de Vigas T a) Ex. 4 – Falso T com Armadura Simples b) Ex. 5 – Viga T com Armadura Simples c) Ex. 6 – Viga T com Múltiplas Camadas de Aço d) Ex. 7 – Viga T com Múltiplas Camadas de Aço com Perda de Seção



Fonte: Autora (2020)

Tabela 18 - Resultados Seção T

Exemplos	B-Strength			Planilha		
	Md (kNcm)	x (cm)	Domínio	Md (kNcm)	x (cm)	Domínio
Exemplo 4	3756	2,98	2	3886	2,98	2
Exemplo 5	45386	17,19	3	44958	17,19	3
Exemplo 6	41837	17,19	3	41340	17,19	3
Exemplo 7	38049	15,47	3	36963	15,47	3

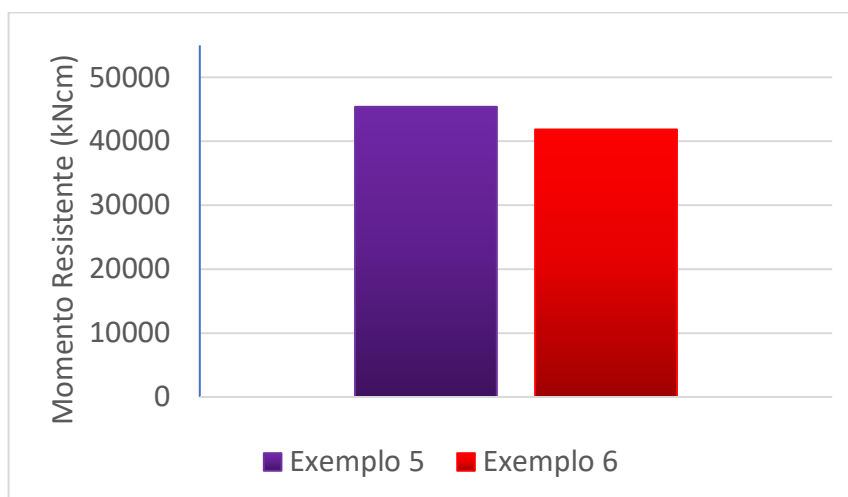
Fonte: Autora (2020)

A Tabela 18 traz resultados interessantes para a análise das armaduras, no Exemplo 4, pode-se perceber como área de aço pode afetar a posição da linha neutra. Nesse caso em específico, uma viga de seção T acaba trabalhando como uma seção retangular, devido a linha neutra estar localizada na mesa.

Outra observação a ser feita a respeito das armaduras é referente aos Exemplos 5, 6 e 7, que possuem a mesma seção e um somatório de área de aço igual, equivalente a 24cm^2 . Contudo, por esta área estar disposta de forma diferente, isso afeta diretamente nos valores do momento resistente e na linha neutra.

No Exemplo 5 a armadura está disposta em uma única camada, por isso possui o maior valor do momento resistente quando comparado ao Exemplo 6 que tem a armadura distribuída em 3 camadas. Isso ocorre porque o centro geométrico da armadura do Exemplo 5 está mais baixo em relação ao Exemplo 6. A Figura 35 ilustra que mesmo com essa diferença o valor para o momento resistente é próximo.

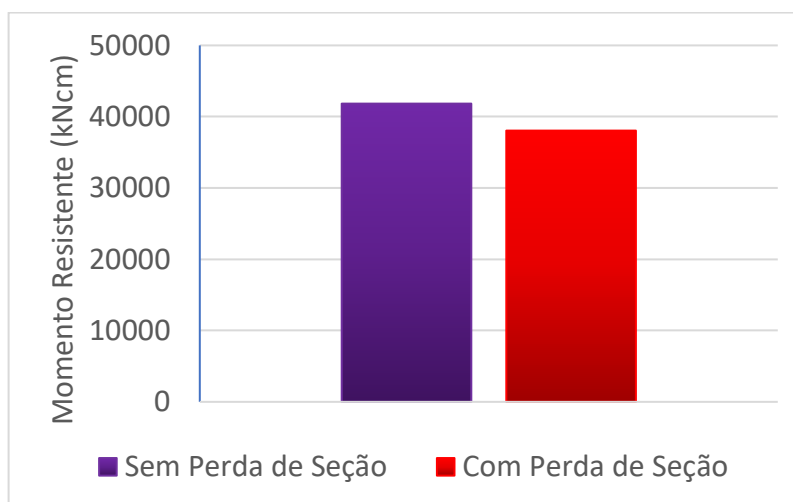
Figura 35 – Momento Resistente X Disposição de Armaduras para as Vigas T



Fonte: Autora (2020)

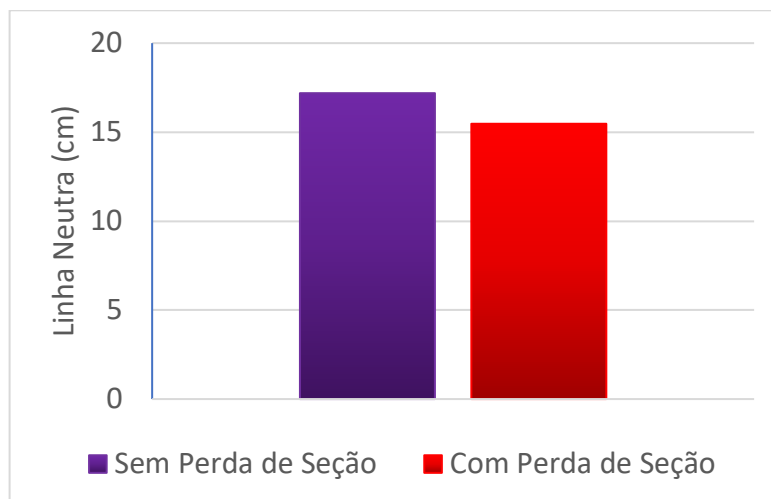
A perda de seção de aço, ocasionada pela corrosão, encontrada no Exemplo 7 afeta diretamente os valores de momento resistente e linha neutra, quando comparado com o Exemplo 6 que possui a mesma seção de aço e ambas dispostas em 3 camadas. A redução do M_d é em torno de 9,05%, como apresentado pela Figura 36, expondo assim, como a corrosão pode interferir no funcionamento da estrutura. A linha neutra tem uma redução de aproximadamente 10% (Figura 37), isso ocorre por consequência a perda de seção, que eleva o centro geométrico das armaduras.

Figura 36 - Momento Resistente X Perda de Seção para as Vigas T



Fonte: Autora (2020)

Figura 37 – Linha Neutra X Perda de Seção para as Vigas T



Fonte: Autora (2020)

Além disso, quando comparados, os valores encontrados através dos dois métodos diferenciaram entre si para momento resistente. Assim foram calculadas as divergências relativas e apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Divergências para as Seções T

Exemplos	Erro Md (%)
Exemplo 4	3,46
Exemplo 5	0,943
Exemplo 6	1,188
Exemplo 7	2,854

Fonte: Autora (2020)

Utilizando uma tolerância de divergência de 5% a ferramenta pode ser considerada como validada para as Seções T.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia vem se tornando cada vez mais importante em diversos segmentos da construção civil, principalmente no âmbito das estruturas, por automatizar inúmeros trabalhos braçais e evitar erros de cálculo. Por esses motivos, a presente monografia teve como objetivo desenvolver uma ferramenta que ajudasse os engenheiros civis, quando a solicitação da verificação da capacidade resistente de vigas se tornasse necessária.

A ferramenta desenvolvida deve se manter simples, segura e precisa, isto é possível graças à criação de uma interface amigável e intuitiva. Para isso, foi utilizado um procedimento de cálculo, seguindo a norma NBR 6118:2014, e chegou-se a resultados satisfatórios, validados através da comparação com planilhas de cálculo.

Além disso, a ferramenta se mostrou prática para a análise do efeito da perda de seção, causado pela corrosão de armaduras na capacidade resistente das vigas. Ao gerar relatórios do formato tipo PDF, o B-Strength permitiu uma maior facilidade para incluir a verificação de momentos fletores de vigas em laudos técnicos e memoriais de cálculo de estruturas já executadas. Desse modo, o trabalho atingiu todos os objetivos específicos traçados.

Por ter sido implementada utilizando bibliotecas bem consolidadas no mercado de trabalho e uma linguagem de programação de fácil aprendizado, utilização e manutenção, fazer os *upgrades* na ferramenta se torna uma tarefa simples.

Finalmente, reitera-se a importância desse trabalho para a formação do engenheiro civil, desenvolvendo habilidades importantes como a programação e ampliando os conhecimentos sobre a análise do comportamento dos elementos estruturais. Este último é fundamental para as visitas técnicas, para a elaboração de laudos periciais de estruturas e para a evolução do engenheiro calculista.

Entre as sugestões de aprimoramento da ferramenta para pesquisas futuras inclui-se a verificação da capacidade resistente ao cisalhamento de vigas considerando as armaduras dos estribos, implementação de sugestões de recuperação conforme o nível de corrosão ou de reforço de acordo com o momento fletor a ser atingido.

Além disso, pode ser estudado a aplicação de outros métodos de aproximação, como o de Newton-Raphson, e de forma que esses métodos

aumentariam a eficiência da ferramenta. Outra proposta de estudo seria incrementar na ferramenta a verificação de outros elementos estruturais como pilares e lajes. Em todos os casos é sugerido que a ferramenta disponibilize, futuramente, o memorial de cálculo em formato PDF.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. v. 1. Rio Grande: Dunas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1**: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BEZERRA, Eric Mateus Fernandes. Otimização multiobjetivo de lajes nervuradas em concreto armado. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

BOLINA, F. L.; TUKITIAN, B. F., HELENE, P. **Patologia de Estruturas**. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p.

BORGES, Alberto Nogueira. **Curso prático de cálculo em concreto armado**: projetos de edifícios. 3. ed. São Cristovão: Imperial Novo Milênio, 2015. 268 p.

CABRAL, Antônio. E. B; CAMPOS, Ana M. R. **Estudo da Agressividade do Ar em Fortaleza - CE**. Inovacon, Coopercon-CE, Sinduscon-CE, Cimento Apodi, PEC/UFC, Fortaleza, 2016.

CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de Concreto Armado**: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação. 3. ed. Brasília: Campus, 2016.

FURTADO, Raul Silveira de Araújo. **Reforço de vigas em estruturas de concreto armado**: estudo de caso. 2016. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2016.

GROCHOSKI, Maurício; HELENE, Paulo. **Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2018.

HELENE, Paulo. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas e concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini Ltda, 1992.

IMPACTO. **Protensão não aderente**. Disponível em: <http://impactoprotensao.com.br/servicos/protensao/protensao-nao-aderente/>. Acesso em: 1 maio 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

OLIVEIRA, Tiago Tadeu Amaral de. **Desenvolvimento de um aplicativo android para o dimensionamento de vigas em concreto armado**. 2014. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

OLIVEIRA, Paulo Henrique da Silva. **Reforço estrutural à flexão, em viga bi-apoiada, com aplicação de compósito estruturado com fibras de carbono**. 2019. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2019.

OLIVEIRA, J. I. F. de; BEZERRA, E. M. F; AMORIM NETO, R. G. de. **Desenvolvimento de um aplicativo android de auxílio no dimensionamento de vigas de concreto armado**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS014. VII., 2014; Rio de Janeiro.

PARIZOTTO, Liana. **Concreto Armado**. Porto Alegre: Sagah Educação S.a., 2017. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595020917/cfi/1!/4/4@0.00:58.5>. Acesso em: 13 mar. 2020.

PINHEIRO, Luís Henrique Bueno. **Reforço de pontes em concreto armado por protensão externa**. 2018. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

REIS, Lília Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SANTOS, Fernanda Pereira Santos Leal dos. **Técnicas de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2017. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

SARAIVA, Guilherme Teles. **Reforço estrutural em vigas de concreto armado utilizando manta de fibra de carbono**. 2016. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2016.