



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



AGATHA FERREIRA OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CONCRETO TÊXTIL EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO**

São Cristóvão, SE

Março/2026

AGATHA FERREIRA OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CONCRETO TÊXTIL EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Sergipe, como pré-requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos
Santos.

São Cristóvão, SE

Março /2026



ATA DE DEFESA

Ágatha Ferreira Oliveira

**Desenvolvimento de Ferramenta Computacional para Dimensionamento de Reforço
com Concreto Têxtil em Vigas de Concreto Armado Submetidas à Flexão**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Sergipe (UFS) como
requisito para o título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovada em: **09 de Março de 2026**

Banca Examinadora		Nota
Orientador(a): Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos (UFS)	–	10,0
Examinador(a): Profa. Dra. Nilma Fontes de Araújo Andrade (UFS)	–	9,0
Examinador(a): Prof. Dr. Josafá de Oliveira Filho (Externo/UFS)	–	10,0
Média Final:		9,7

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder a oportunidade de concluir esta graduação e por me fortalecer em cada desafio enfrentado ao longo dessa caminhada.

À minha família, especialmente aos meus pais, Andressa e Gil, à minha irmã, Maria Eduarda, e aos meus avós, Santina e Antônio, por todo amor, apoio e incentivo. Mesmo à distância, vocês foram meu abrigo e os pilares que me sustentaram durante todos esses anos.

À minha amiga Yasmin, por estar sempre presente, pelos conselhos, pelo apoio e por ouvir pacientemente cada áudio enviado nos momentos de angústia e alegria. Agradeço também a Alisson, Susann e Jackson, que se tornaram minha família em Sergipe e tornaram essa trajetória mais leve e especial.

Ao meu amor, Yanka, pelo apoio incondicional, paciência, por acreditar em mim até quando eu mesma duvidei e por ser o combustível que me impulsionou a concluir esta jornada. Obrigada por ser minha calma e meu ponto de paz.

Aos meus amigos e colegas de profissão, Milene, Karol, Luiz, Camila, Sara Anllivy, Thalita, Liz e Sara Araújo, por transformarem os corredores da UFS em um verdadeiro lar, por todas as maratonas de estudo, trabalhos em conjunto, conversas e risadas. É uma honra dividir essa conquista com vocês.

Compartilho minha gratidão a todos os profissionais com quem tive a oportunidade de trabalhar ao longo da graduação, especialmente às equipes da SKD Projetos, do SENAC Sergipe e da CF2 Empreendimentos, pelos ensinamentos, pela confiança e pelas experiências que contribuíram significativamente para minha formação. De modo especial, agradeço à Kelly, pelo apoio desde o início dessa trajetória, por reacender em mim o amor pela área de estruturas e por ser uma referência de dedicação e inspiração profissional.

Por fim, agradeça aos docentes do Departamento de Engenharia Civil da UFS, pela dedicação e pelos ensinamentos transmitidos ao longo da graduação, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Emerson Figueiredo, pelo acompanhamento, orientações e pelo suporte oferecido durante o desenvolvimento deste trabalho. Estendo meus agradecimentos aos demais funcionários da universidade, pelo cuidado, apoio e segurança proporcionados durante toda essa trajetória.

RESUMO

O concreto armado é o material mais utilizado para fins estruturais na construção civil atualmente, no entanto, a necessidade de reforço ou readequação das estruturas é cada vez mais frequente. Nesse contexto, surgem novas pesquisas sobre um compósito composto de concreto com agregados finos reforçado com tecidos multiaxiais, que podem ser de fibras naturais, basalto, carbono ou vidro. Esse compósito ficou conhecido na literatura como Concreto Têxtil (CT). O presente trabalho tem como foco o estudo do CT aplicado em reforços estruturais para vigas de concreto armado submetidas à flexão e o desenvolvimento de um programa computacional para o dimensionamento desse reforço. Para atingir o objetivo principal, foram realizadas uma revisão bibliográfica e uma análise dos métodos de cálculo disponíveis na literatura. O programa criado foi desenvolvido em Python e seu código está disponível no Apêndice B. Os resultados obtidos foram analisados e comparados com dados experimentais disponíveis na literatura, permitindo observar que o modelo de Beber apresentou elevada correlação com os dados experimentais, enquanto o modelo de Trintin revelou um caráter mais conservador. Além disso, constatou-se a alta eficiência da fibra nacional, sinalizando um caminho promissor para o desenvolvimento da tecnologia no Brasil. A ferramenta computacional desenvolvida provou ser um mecanismo prático e ágil para a análise comparativa de métodos de cálculo, validando a segurança estrutural do reforço. Por fim, o estudo aponta para a necessidade de maior padronização das fibras e a ampliação de ensaios experimentais para subsidiar uma futura normatização nacional.

Palavras-chave: Concreto Têxtil (CT). Reforço estrutural. Automatização de dimensionamento.

ABSTRACT

Reinforced concrete is currently the most widely used structural system in civil construction; however, the need for strengthening or retrofitting structures is becoming increasingly frequent. In this context, new research has emerged on a composite consisting of fine-aggregate concrete reinforced with multiaxial textiles, which can be made of natural fibers, basalt, carbon, or glass. This composite has become known in the literature as Textile Reinforced Concrete (TRC). The focus of this work is the study of TRC applied as structural reinforcement for reinforced concrete beams subjected to bending, as well as the development of a computational program for the design of such reinforcement. To achieve the main objective, a literature review and an analysis of the calculation methods available in the literature were conducted. The program was developed in Python, and its code is available in Appendix B. The results obtained were analyzed and compared with experimental data from the literature, showing that Beber's model presented a high correlation with experimental data, while Trintin's model revealed a more conservative character. Furthermore, the high efficiency of natural fiber was observed, signaling a promising path for the development of this technology in Brazil. The developed computational tool proved to be a practical and agile mechanism for the comparative analysis of calculation methods, validating the structural safety of the reinforcement. Finally, the study points to the need for greater fiber standardization and the expansion of experimental testing to support future national standardization.

Keywords: Textile Reinforced Concrete (TRT). Reinforced Concrete Beams. Calculation Automation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferença entre Reforço e Recuperação	23
Tabela 2 - Propriedades do têxtil.....	40
Tabela 3 - Dados da viga de referência ensaiada por Nora (2018).....	52
Tabela 4 - Análise comparativa Experimental x TRINTIN (2024).....	53
Tabela 5 - Análise comparativa Experimental x BEBER (2003).....	53
Tabela 6 - Análise TRINTIN (2024) x BEBER (2003).....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagramas de tensão indicativos dos estádios de cálculo.	15
Figura 2 - Domínios de estado-limite último de uma seção transversal	16
Figura 3 - Tensão x Deformação.....	18
Figura 4 - Diagrama $\sigma \times \epsilon$ parábola retângula para $f_{ck} \leq 50$ MPa	18
Figura 5 -Distribuição de tensões e deformações em uma seção transversaç	19
Figura 6 - Distribuição de tensões de compressão segundo os diagramas	19
Figura 7 - Sistemas de reforço do concreto.....	24
Figura 8 - Exemplos de têxtil feitos de vidros álali-resistentes	25
Figura 9 - Fachada da extensão do pavilhão de ensaios do Instituto de Concreto Estrutural; Universidade RWTH Aachen, Alemanha.	26
Figura 10 - Passarela em Concreto Têxtil	27
Figura 11 - Comportamento característico à flexão, curva carga x deslocamento.	27
Figura 12 - Aplicação de CT como reforço	28
Figura 13 - Modelos de ancoragem.....	30
Figura 14 - Diagrama da seção transversal reforçada com CT	31
Figura 15 - Diagrama esquemático de equilíbrio da seção transversal reforçada.....	35
Figura 16 - Fluxograma para determinação do momento último da seção	37
Figura 17 - Coleta de dados para o método de TRINTIN.....	39
Figura 18 - Coleta de dados para o método de BEBER.....	39
Figura 19 - Dados do reforço têxtil para o modelo de Trintin (2024) no <i>Python</i>	41
Figura 20 - Dados do reforço têxtil para o modelo de Beber (2003) no <i>Python</i>	42
Figura 21 - Influência do número de camadas	43
Figura 22 – Dimensionamento pelo método de cálculo I no <i>Python</i> – cálculo do df.....	44
Figura 23 - Rotina para dimensionamento pelo método de cálculo Trintin no <i>Python</i>	45
Figura 24 - Função resultados no <i>Python</i> para modelo de cálculo Trintin.....	45
Figura 25 - Ilustração da saída de dados (resultados) para o modelo de cálculo Trintin.	46
Figura 26 - Fluxograma Modelo de Trintin	46
Figura 27 – Rotina para Dimensionamento de reforço por BEBER.....	47
Figura 28 – Rotina de determinação da linha neutra por BEBER no <i>Python</i>	48
Figura 29 – Rotina de determinação da linha neutra por BEBER no <i>Python</i>	49
Figura 30 - Rotina para determinação do momento último	49

Figura 31 - Função resultados no modelo de cálculo II.....	50
Figura 32 – Saída de dados (resultados) no modelo de cálculo Beber.	50
Figura 33 - Fluxograma Modelo de Beber.....	51
Figura 34 - Exemplo: dados de entrada	60
Figura 35 - Exemplo: dados de entrada II	61
Figura 36 - Exemplo: menu principal.....	61
Figura 37 - Exemplo: tabela comparativa	62
Figura 38 - exemplo: Encerramento do programa.....	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	CONCRETO ARMADO	14
3.1.1	Estados limites.....	14
3.1.2	Estádios e Domínios de Deformação.....	15
3.2	DIMENSIONAMENTO DE VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO	17
3.2.1	Hipóteses Básicas	17
3.2.2	Equilíbrio da seção.....	19
3.2.3	Dimensionamento da armadura necessária.....	22
3.3	DURABILIDADE E REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO.	22
3.4	CONCRETO TÊXTIL	23
3.5	CUIDADOS NA EXECUÇÃO	29
4	MÉTODOS DE CÁLCULO.....	31
4.1	MODELO DE CÁLCULO TRINTIN.....	31
4.2	MODELO DE CÁLCULO BEBER	35
5	MODELAGEM DO ALGORITMO DE CÁLCULO.....	39
5.1	DADOS DE ENTRADA	39
5.2	DADOS DO REFORÇO	40
5.3	ALTURA ÚTIL DO REFORÇO	42
5.4	DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO	44
5.4.1	Modelo de Cálculo TRINTIN.....	44
5.4.2	Modelo de Cálculo BEBER.....	47
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
	APÊNDICE A – MANUAL DO PROGRAMA DE DIMENSIONAMENTO	60
	APÊNDICE B – CÓDIGO COMPLETO	63

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado está presente nas obras de engenharia civil há mais de um século, se destacando por sua resistência, boa trabalhabilidade e relativa simplicidade de dimensionamento. Quando adequadamente projetado e executado, este material apresenta alta durabilidade, atendendo aos requisitos de vida útil das normas de desempenho vigentes.

Apesar de sua consolidação no mercado, ainda são frequentes as manifestações patológicas decorrentes de falhas no dimensionamento, na execução ou devido à manutenção inadequada. Além disso, ao longo da vida útil da estrutura, pode ocorrer a perda da capacidade de carga em função de fatores como a degradação dos elementos construtivos ou modificações na utilização da edificação que resultem no aumento das cargas solicitantes. Para sanar tais problemáticas, diferentes técnicas de reforço estrutural são empregadas, como a colagem de chapas de aço, o aumento da seção transversal do elemento (encamisamento) e o uso de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC).

Atualmente, uma nova tecnologia vem ampliando seu espaço no cenário internacional: o Concreto Têxtil (CT). Desenvolvido inicialmente na Alemanha, o CT utiliza malhas de fibras de alta resistência, como carbono, fibras naturais, vidro ou basalto envolvidas por uma matriz de concreto com agregados finos. Além de ser utilizado na construção de novas estruturas, como passarelas e coberturas, o compósito vem se mostrando relevante como reforço estrutural, pois, diferente dos métodos convencionais, o CT destaca-se pela alta resistência e imunidade à corrosão de suas armaduras têxteis, o que permite a utilização de camadas extremamente esbeltas, reduzindo o peso próprio adicional e preservando a arquitetura original da estrutura.

Paralelamente ao avanço dos materiais, a engenharia civil tem buscado, de forma crescente, a integração de ferramentas computacionais com o objetivo de otimizar os processos de projeto. Desse modo, a utilização de linguagens de programação, como o Python, apresenta-se como uma alternativa eficiente para o

aumento da produtividade e a redução de falhas humanas, além de permitir a análise ágil de diferentes cenários de projeto.

Entretanto, a carência de um método normativo brasileiro totalmente consolidado para o dimensionamento de reforços com concreto têxtil ainda representa um desafio para a prática profissional.

Diante deste cenário, o presente trabalho tem como foco analisar e propor um algoritmo em Python para o dimensionamento de reforço utilizando concreto têxtil para vigas de concreto armado submetidas à flexão. A ferramenta será fundamentada em metodologias de cálculo e dados experimentais presentes na literatura, buscando validar a eficiência da automação frente a casos experimentais e contribuir para a viabilização técnica deste novo método de reforço no país.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como principal objetivo a elaboração de um algoritmo de cálculo em Python para o dimensionamento de reforços para vigas submetidas à flexão utilizando o concreto têxtil fundamentado em modelos analíticos e dados experimentais da literatura.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar o algoritmo de cálculo;
- Validar as ferramentas;
- Realizar análise comparativa entre os métodos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar os principais conceitos teóricos que fundamentam o presente estudo. Nesta seção, são abordados aspectos relacionados ao concreto armado, suas propriedades mecânicas, comportamento estrutural e limitações, bem como os fundamentos necessários para a compreensão das técnicas de reforço estrutural discutidas neste trabalho.

3.1 CONCRETO ARMADO

O Concreto é um material de construção proveniente da mistura em proporção adequada de aglomerantes, normalmente cimento Portland, agregados graúdos e miúdos e água (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2007).

Segundo Chust Carvalho e Figueiredo Filho (2019), para utilização estrutural, o concreto sozinho não é adequado como elemento resistente pois, enquanto tem uma boa resistência à compressão, pouco resiste à tração, com cerca de 1/10 da resistência à compressão. Para contornar essas limitações, o aço é empregado em conjunto com o concreto, e convenientemente posicionado na peça de modo a resistir às tensões de tração (BASTOS, 2023).

Desse modo, a ABNT NBR 6118:2023 define elementos de concreto armado como aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência.

3.1.1 Estados limites

As estruturas de concreto armado devem ser projetadas de modo que garantam a segurança e a capacidade de utilização da estrutura. Essa segurança está condicionada à verificação dos estados limites. Os estados limites podem ser classificados em estados limites últimos ou estados limites de serviço, conforme sejam referidos à situação de ruína ou de uso em serviço, respectivamente (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2007).

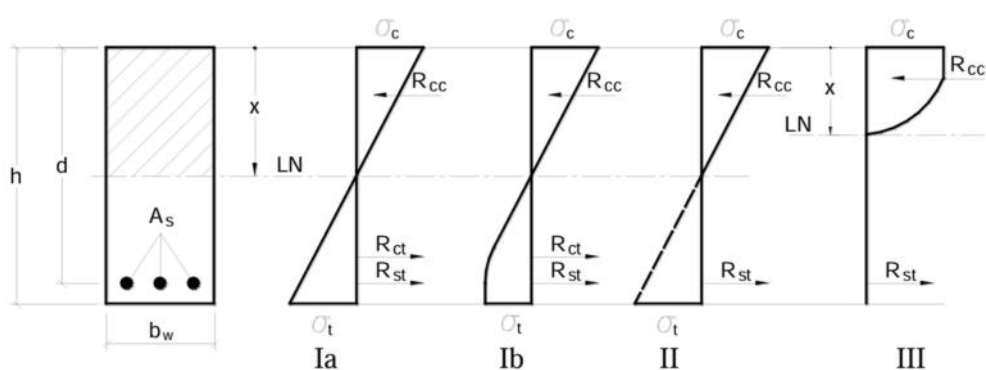
O estado limite último é aquele relacionado ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína da estrutura que determine a paralisação, no todo ou em parte, do uso da estrutura. (CHUST CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2019). As principais causas que podem levar uma estrutura de concreto a um estado limitem são perda de estabilidade de uma parte ou conjunto da estrutura, instabilidade por deformação, ruptura de seções críticas da estrutura, deterioração por efeito de fadiga e deformações elásticas ou plásticas. (FUSCO,1977).

Os estados limites de serviço são aqueles definidos pela ABNT NBR 6118:2023 como 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.

3.1.2 Estádios e Domínios de Deformação

Segundo Bastos (2023), os Estádios podem ser definidos como os estágios de tensão pelos quais um elemento fletido passa, desde o carregamento inicial até a ruptura. A Figura 1 descreve às tensões de uma seção transversal de uma viga submetida a um carregamento crescente, a partir de zero.

Figura 1 - Diagramas de tensão indicativos dos estádios de cálculo.



Fonte: BASTOS (2023)

corresponde um esforço normal, se houver, e um momento fletor atuante na seção. (CHUST CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2019).

3.2 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO

Vigas são elementos lineares, ou seja, são elementos que têm seu comprimento longitudinal maior em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal, em que a flexão é preponderante. (ABNT NBR 6118:2023).

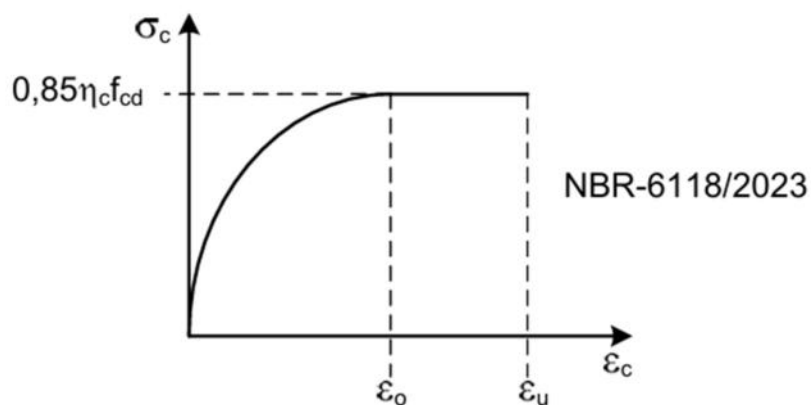
Seu dimensionamento, assim como de todas as estruturas, deve garantir que ela suporte, de forma segura, estável e sem deformações excessivas, todas as solicitações às quais estará submetida durante sua vida útil. (CHUST CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2019).

3.2.1 Hipóteses Básicas

Para o dimensionamento de vigas submetidas a momento fletor, deve-se analisar os esforços resistentes no Estado Limite Último (ELU) e para tal, algumas hipóteses básicas são definidas no item 17.2.2 da ABNT NBR 6118:2023, sendo elas:

- a) As seções transversais se mantêm planas após a deformação (hipótese de Bernoulli);
- b) Existe aderência perfeita entre o aço e o concreto, ou seja, as deformações sofridas pelas barras da armadura são as mesmas do concreto ao seu entorno;
- c) As tensões de tração no concreto são desprezadas no ELU;
- d) A distribuição de tensões no concreto é feita de acordo com o diagrama tensão-deformação, mostrado na figura abaixo.

Figura 3 - Tensão x Deformação

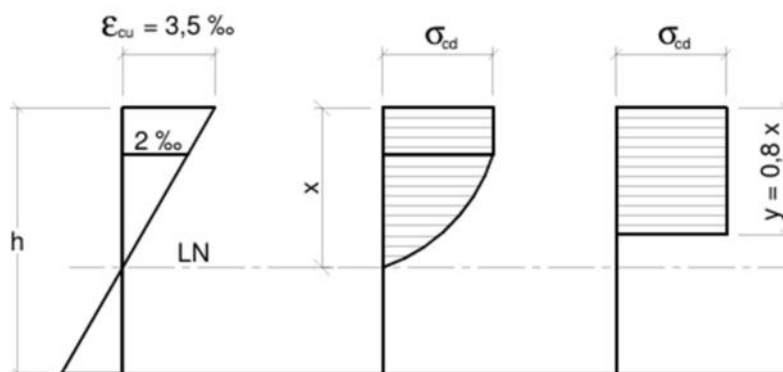


Fonte: ABNT NBR 6118:2023

Esse diagrama pode ser substituído por um retângulo simplificado, como ilustrado na Figura 4, de profundidade igual a $y = \lambda x$, onde o valor do parâmetro λ é igual a:

- $\lambda = 0,8$, para $f_{ck} \leq 50$ MPa; ou (1)

- $\lambda = 0,8 - \frac{f_{ck}-50}{400}$, para $f_{ck} > 50$ MPa; (2)

Figura 4 - Diagrama $\sigma \times \epsilon$ parábola retângula para $f_{ck} \leq 50$ MPa

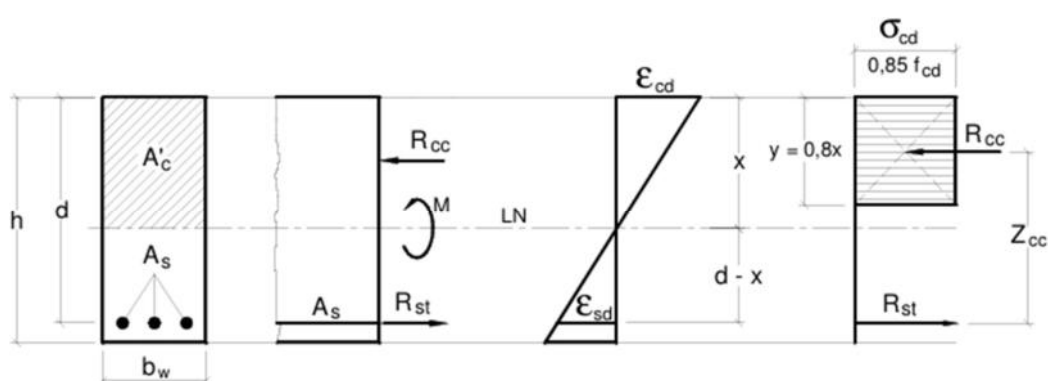
Fonte: BASTOS (2015)

e) o ELU é caracterizado segundo os domínios de deformação;

3.2.2 Equilíbrio da seção

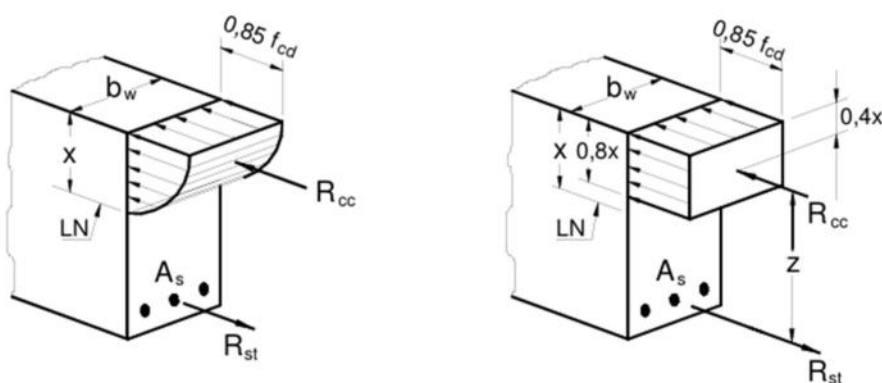
Chust Carvalho e Figueiredo Filho (2019) definem que para o cálculo da área de armadura longitudinal em seções transversais retangulares, conhecidas a resistência à compressão do concreto (f_{ck}), a largura da seção (b_w), a altura útil (d) e o tipo de aço (f_{yd} e ε_{yd}), é preciso determinar as equações de equilíbrio do sistema. As Figuras 5 e 6 ilustram as forças atuantes em uma viga de seção transversal retangular para concretos com $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$.

Figura 5 -Distribuição de tensões e deformações em uma seção transversaça



Fonte: BASTOS (2015)

Figura 6 - Distribuição de tensões de compressão segundo os diagramas



Fonte: BASTOS (2015)

Como observado nas imagens, não há forças externas atuando na seção, portanto, o equilíbrio da seção pode ser definido como:

- a) equilíbrio das forças atuantes normais à seção transversal: a força atuante no concreto (R_{cc}) deve ser igual a força atuante na armadura (R_{st})

$$\sum F = 0 ; R_{cc} - R_{st} = 0 ; R_{cc} = R_{st} \quad (3)$$

- b) equilíbrio dos momentos: o momento das forças internas em relação ao C.G da armadura deve ser igual ao momento externo de cálculo.

$$\sum M = M_d ; M_d = R_{cc} \cdot z \quad (4)$$

Pode-se calcular a força atuante no concreto a partir da relação entre tensão e área resistente, sendo a tensão definida por $\sigma = R/A$. Portanto, considerando o diagrama retangular (BASTOS, 2015):

$$R_{cc} = \sigma_{cd} \cdot A'_c \quad (5)$$

onde:

σ_{cd} é a tensão de cálculo atuante no concreto.

A'_c é área comprimida equivalente do concreto

A tensão de compressão no concreto (σ_{cd}) pode ser obtida a partir do diagrama tensão-deformação ilustrado nas Figuras 4 e 5. Considerando o diagrama retangular simplificado para concretos com $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ a força resultante do concreto pode ser definida como:

$$R_{cc} = 0,85 \cdot \eta_c \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot bw \quad (6)$$

onde:

η_c é o coeficiente do diagrama de compressão do concreto, especificado no item 8.10.2.1 da ABNT NBR 6118;

f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto à compressão.

x é a profundidade da linha neutra.

bw largura da seção transversal.

Já a força resultante no aço pode ser definida como:

$$R_{st} = \sigma_{sd} \cdot A_s \quad (7)$$

onde:

σ_{sd} é a tensão de cálculo na armadura tracionada

A_s é a área de aço na armadura tracionada.

O braço de alavanca (z) pode ser definido como:

$$z = d - 0,4 \cdot x \quad (8)$$

Adicionando R_{cc} e z tem-se que:

$$M_d = 0,85 \cdot \eta_c \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b_w \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad (9)$$

Para os casos onde f_{ck} é menor ou igual a 40MPa pode-se definir o coeficiente de diagrama do concreto como $\eta_c = 1$. Logo,

$$M_d = (0,68 \cdot x \cdot d - 0,272 \cdot x^2) \cdot b_w \cdot f_{cd} \quad (10)$$

Resolvendo a equação 10 e isolando x , pode-se obter a posição da linha neutra com:

$$x = \frac{0,68 \cdot d \pm \sqrt{(0,68 \cdot d)^2 - 4 \cdot 0,272 \cdot \left(\frac{M_d}{b_w \cdot f_{cd}}\right)}}{0,544} \quad (11)$$

O item 14.6.4.3 da ABNT NBR 6118:2023 restringe a posição da linha neutra para elementos como vigas e lajes para proporcionar o adequado comportamento dúctil, eliminando, portanto, parte do domínio 3 e os domínios 4 e 4a. Para o ELU, deve-se obedecer aos seguintes limites:

- $x/d \leq 0,45$ para concretos com $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$;
- $x/d \leq 0,35$ para concretos com $50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$.

Ainda de acordo com essa norma esses limites podem ser alterados se forem utilizados detalhes especiais de armaduras, como, por exemplo, os que produzem confinamento nessas regiões. (ABNT NBR 6118:2023).

3.2.3 Dimensionamento da armadura necessária

Com a posição da linha neutra definida, é possível calcular a área de aço tracionada necessária na seção. Substituindo a equação 3,7 e 8 na equação 4 tem-se que:

$$M_d = \sigma_{sd} \cdot A_s \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad (12)$$

Logo,

$$A_s = \frac{M_d}{\sigma_{sd} \cdot (d - 0,4 \cdot x)} \quad (13)$$

3.3 DURABILIDADE E REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO.

Segundo a ABNT NBR 6118:2023, durabilidade consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Já a NBR 15575-1:2013 define vida útil (VUP) como período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento dos níveis de desempenho previstos em norma, sendo que para estruturas convencionais, esse período é de no mínimo 50 anos.

No entanto, ao longo do ciclo de vida da edificação, que compreende as etapas de planejamento, projeto, execução e uso (GOMIDE, 2020), diversos fatores podem contribuir para o surgimento de manifestações patológicas, definidas por Bolina Fabrício (2019) como anomalias visíveis ou observáveis que indicam falhas no comportamento normal da estrutura.

A falta de atenção à durabilidade das estruturas tem contribuído para acelerar a deterioração de diversas construções relativamente novas (ARAÚJO, 2023). Nesse contexto, a patologia das construções surge como uma área do conhecimento voltada ao estudo dos defeitos que ocorrem nos materiais construtivos, nos elementos estruturais ou na estrutura como um todo, buscando inspecionar, diagnosticar e tratar

os fenômenos e manifestações patológicas, devolvendo a segurança e o desempenho da estrutura, conforme discutido por Bolina Fabrício (2019).

Dentre os tipos de tratamento, deve-se diferenciar recuperação e reforço estrutural. Recuperação, segundo Adorno Felipe (2017), pode ser caracterizada como a forma de viabilizar o uso de um elemento estrutural após o surgimento de patologias que comprometem a resistência e a utilização da estrutura. Já reforço pode ser caracterizado como a intervenção realizada em uma estrutura para aumento de sua capacidade resistente sem que a mesma tenha atingido um estado limite último.

Tabela 1 - Diferença entre Reforço e Recuperação

Reforço	Recuperação
Intervenção em uma estrutura existente, aumentando sua capacidade resistente antes de atingir o seu estado-limite.	Reestabelecimento do uso e da segurança de uma estrutura danificada.

Fonte: ADORNO Felipe (2017)

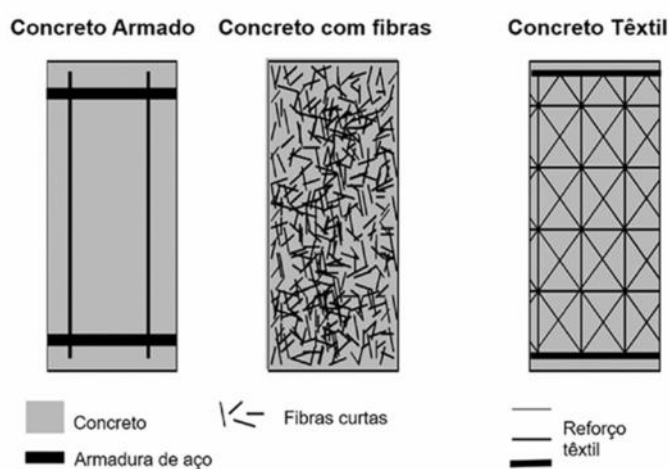
Em ambas as situações, as técnicas executivas e de projeto são semelhantes. Dentre elas, podemos destacar adição de armaduras de complementação ou de reforço, colagem de chapas de aço, inserção de perfis de aço, e reforços com fibra de carbono e concreto têxtil, objeto desse estudo (ADORNO, Felipe 2017).

3.4 CONCRETO TÊXTIL

O Concreto Têxtil (CT), conhecido internacionalmente como *Textile Reinforced Concrete (TRC)*, é um compósito desenvolvido na Alemanha que combina as vantagens do concreto armado comum com concreto reforçado com fibras (HEGGER et al., 2006b).

A grande diferença entre o Concreto com fibras e o Concreto Têxtil, é decorrente do alinhamento do reforço têxtil, cuja orientação se dá na direção dos esforços principais, como ilustra a Figura 7, o que garante características diferentes aos concretos reforçados com as fibras descontínuas, dispersas na matriz (PELED; MOBASHER; BENTUR, 2017).

Figura 7 - Sistemas de reforço do concreto

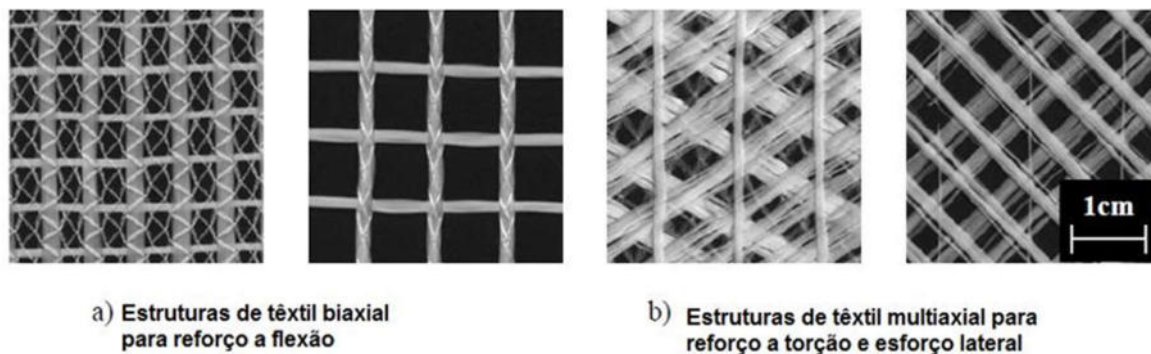


Fonte: Hegger et al. 2006b

No concreto têxtil, o compósito é formado por um tecido têxtil (de vidro, carbono ou basalto) incorporado a uma matriz cimentícia composta por agregados de granulometria fina e relação água/cimento (a/c) na faixa de 0,40 a 0,45, que é o limite inferior do concreto tradicional, o que torna o CT mais durável em relação ao desempenho da matriz, especialmente em relação ao controle de fissuras (PELED; MOBASHER; BENTUR, 2017). Os tecidos podem ter diferentes configurações, de acordo com a forma de fabricação, sendo que mais comuns são as bi-axial e multi-axial, conforme Figura 8, uma vez que estas oferecem uma grande flexibilidade de

propriedades e são adequados para muitos usos (GRIES et al, 2006 *apud* NORA Juliana, 2018).

Figura 8 - Exemplos de têxtil feitos de vidros álcali-resistentes



Fonte: (Ortlepp (2007, p. 30, tradução livre *apud* NORA Juliana p.47)

Além disso, outra vantagem do CT é a resistência à corrosão das fibras, o que reduz a necessidade de proteção química do material. Dessa forma, a espessura do elemento passa a depender apenas do valor necessário para garantir a ancoragem adequada das fibras e evitar falhas por delaminação. Como resultado, é possível obter estruturas mais esbeltas e com melhor acabamento superficial, o que torna o CT uma alternativa atrativa para aplicações arquitetônicas, proporcionando maior liberdade criativa (HEGGER et al., 2006b).

Apesar das vantagens, alguns obstáculos surgem na utilização do CT a partir das diferenças de comportamento em relação ao concreto tradicional. Hegger et al definem os principais como sendo:

- a) Os materiais têxteis comuns, como o vidro ou o carbono, apresentam falha frágil perfeita, ou seja, não possuem capacidade de deformação plástica;
- b) Uma vez que não há perfilamento do reforço que o fixa mecanicamente à matriz de concreto, a ligação depende exclusivamente da adesão e do atrito;
- c) Se não estiverem coladas por uma laminação adicional, os filamentos do têxtil podem não absorver as mesmas tensões quando a carga é aplicada ao compósito.

Devido à diversidade de fibras e métodos de aplicação, não é possível realizar uma descrição universal dos materiais, o que dificulta a normatização e dimensionamento do material. Portanto, o principal objetivo dos estudos atuais é investigar cada combinação de tipos de fibra e matriz de concreto, afim de calibrar os parâmetros de um modelo de CT. (HEGGER et al., 2006b).

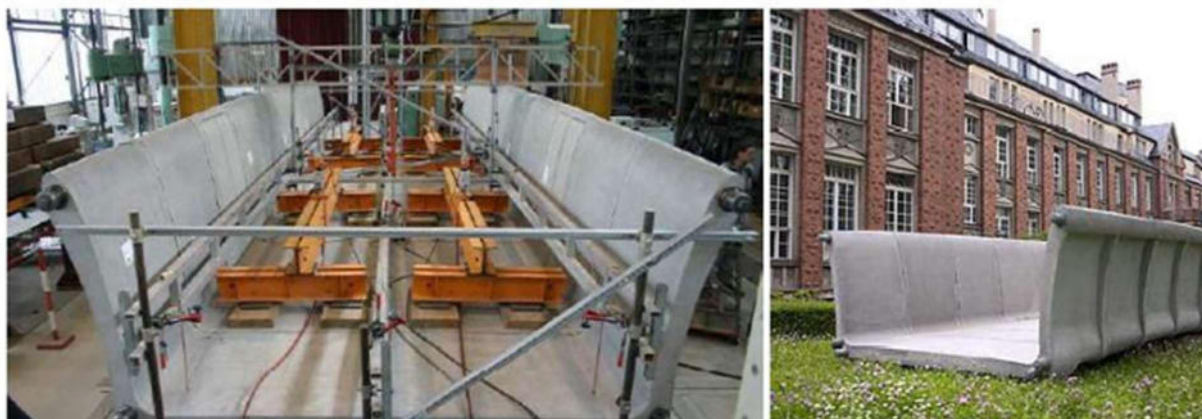
Atualmente, o Concreto Têxtil é utilizado principalmente na produção de fachadas, elementos sanduíches autossustentáveis, cascas, passarelas e reforços estruturais (HEGGER; VOSSY, 2008). Um exemplo dessa aplicação em fachadas pode ser observado na Figura 9, que apresenta a extensão do pavilhão de ensaios da Universidade RWTH Aachen, na Alemanha. Nota-se, por meio dessa imagem, a viabilidade estética e a esbeltez permitida pelo uso do material em elementos de fechamento.

Figura 9 - Fachada da extensão do pavilhão de ensaios do Instituto de Concreto Estrutural; Universidade RWTH Aachen, Alemanha.



Fonte: (HEGGER; VOSSY, 2008).

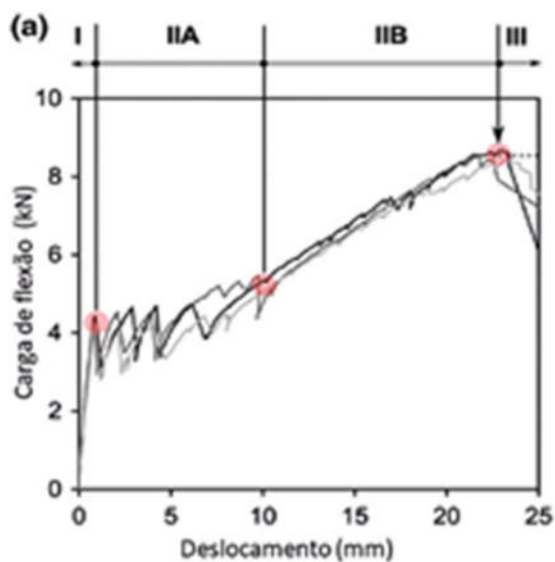
Figura 10 - Passarela em Concreto Têxtil



Fonte: Hegger (2006)

O comportamento mecânico do CT sob flexão, que simula condições reais de uso, é ilustrado pela curva carga versus deslocamento apresentada na Figura 11. Nota-se que o comportamento é dividido em estágios distintos (I, II e III), que representam desde o estado íntegro até a fissuração e a mobilização total da armadura têxtil.

Figura 11 - Comportamento característico à flexão, curva carga x deslocamento.



Fonte: (Williams Portol, Nyholm Thrane e Lundgren, 2017 apud ORTOLAN, Vinicius et al, 2020)

O comportamento do CT em cada estágio é descrito por ORTOLAN, Vinicius et al (2020, p.60):

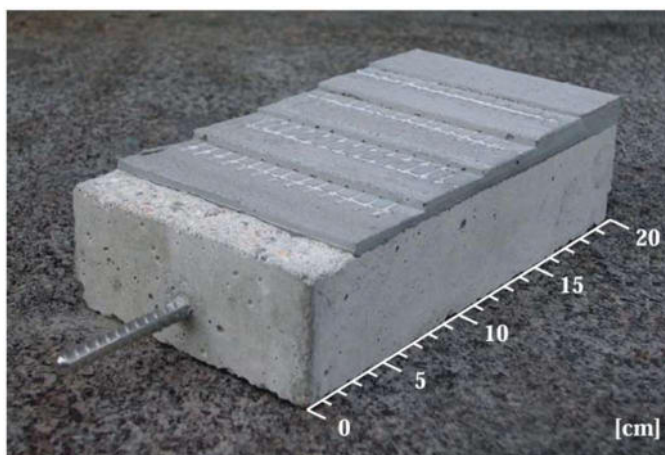
“No estágio I, há influência do regime elástico do material, não há surgimento de fissuras nesta região e o concreto permanece suportando os esforços. No estágio II, existe ocorrência de fissuras, com avanço da carga com o deslocamento. No estágio IIA há multiplicação das fissuras e no IIB não há surgimento de novas fissuras, apenas aumento da abertura das existentes, consecutivamente a carga é transferida direta mente para o tecido. A falha do sistema principia com o estágio III. Nesta etapa, há falha da aderência das fibras no concreto, ocorre a redução acentuada da carga, que pode ser atribuída ao escorregamento dos filamentos externos do fio. O sistema rompe quando há deslizamento dos filamentos do núcleo, desenvolvendo, assim, rompimento das fibras em forma telescópica - este modo de falha acontece lentamente por altas deformações.”

Como reforço, o CT vem ganhando destaque na literatura graças às suas propriedades e benefícios na execução em relação a outros tipos de reforços.

Um exemplo dessas vantagens ocorre em situações de incêndio, já que reforços que utilizam resina, como chapa colada e fibra de carbono, perdem a resistência com o aumento das temperaturas, diferente do CT que utiliza concreto como material aderente. (NORA, Juliana 2018).

A Figura 10 ilustra a aplicação do concreto têxtil como reforço em um elemento de concreto armado.

Figura 12 - Aplicação de CT como reforço



Fonte: Ortlepp (2006, p. 2).

3.5 CUIDADOS NA EXECUÇÃO

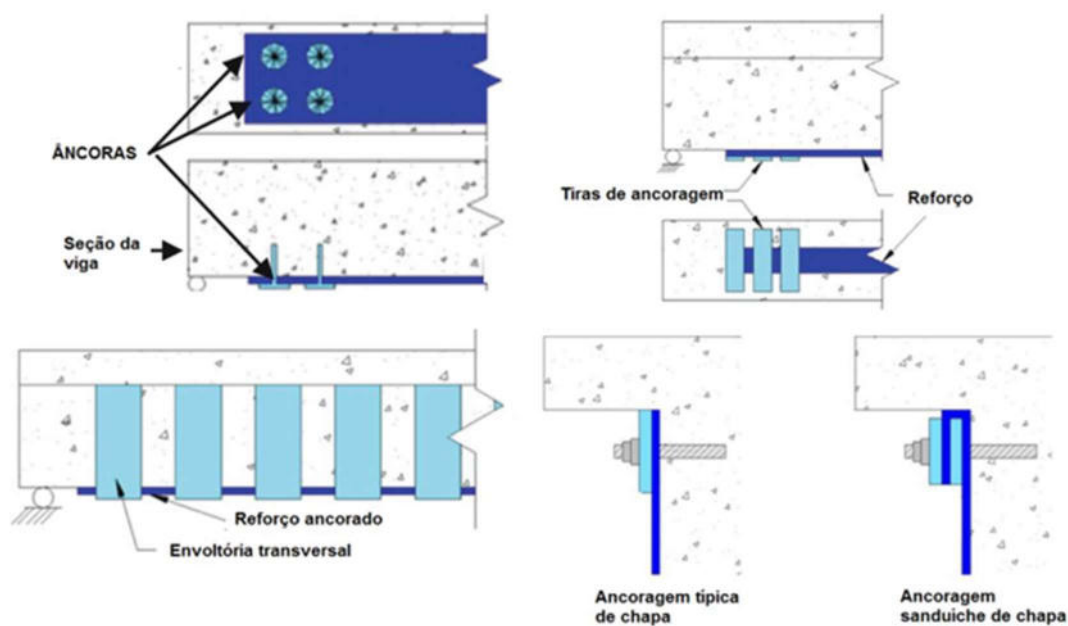
Uma das fases mais importantes de um reforço estrutural é a sua aplicação, pois é essencial que sejam seguidas recomendações quanto a preparação da superfície e aplicação do reforço de modo a evitar descolamentos prematuros e falha na aderência.

Para a preparação do substrato, deve-se remover a nata de cimento da estrutura a ser reforçada de forma a deixar os agregados do concreto antigos aparentes. Duas técnicas ganham destaque na literatura quanto à preparação da superfície: o apicotamento mecânico e o jateamento com granalha de aço. Dalazen (2021) destaca em seus experimentos que as vigas preparadas com jateamento obtiveram melhores resultados quanto à carga de ruptura. Além disso, é importante destacar que se deve realizar uma saturação prévia no substrato, até que se atinja a condição de superfície saturada seca, antes da aplicação no reforço. Ortlepp (2006) adverte que a base de concreto deve estar devidamente saturada antes da aplicação do reforço para evitar a migração de água da matriz de reparo para o concreto antigo, o que comprometeria a zona de transição interfacial.

Quanto à aplicação do Concreto Têxtil, é necessário destacar a importância da ancoragem na redução da falha por adesão ou aderência. Segundo ORTLEPP et al., *apud* NORA, “é necessário que haja uma ancoragem mínima, pois de outra forma, apenas parte do carregamento é ancorado à superfície e assim os elementos romperão na interface entre o concreto antigo e o reforço.”

Para que o sistema de reforço funcione corretamente, é fundamental garantir a ancoragem adequada nas extremidades e ao longo do vão. A Figura 13 exemplifica diferentes métodos de ancoragem, como o uso de âncoras mecânicas, tiras de fibra e envoltórias transversais. Nota-se que esses dispositivos têm a função principal de impedir o descolamento prematuro do reforço, garantindo que o material suporte os esforços de tração para os quais foi dimensionado.

Figura 13 - Modelos de ancoragem



Fonte: Grelle, Sneed (2013) *apud* Nora, Juliana (2018).

Nos experimentos de Nora (2018), foi utilizada ancoragem em forma de “U” em determinadas vigas e constatado que estas obtiveram melhores resultados do que as sem ancoragem.

Quanto ao método de aplicação, é recomendado laminação, onde as camadas de Concreto Têxtil são posicionadas, de forma alternada com a matriz de concreto, umas sobre as outras até que sejam atingidos o número e a espessura de camadas desejadas, criando um material conjugado laminado. (SILVA, Tatiana 2023)

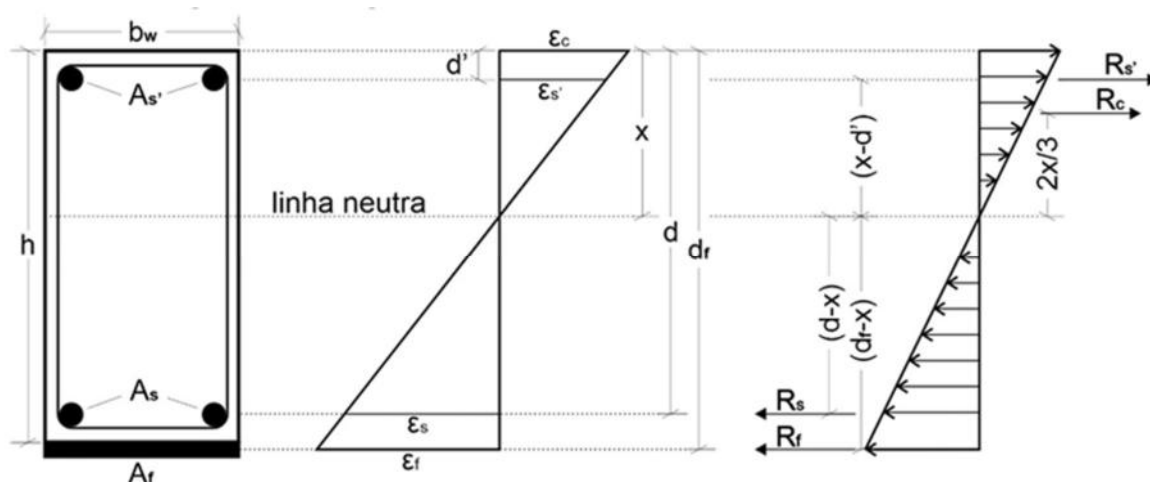
4 MÉTODOS DE CÁLCULO

Para base do algoritmo de cálculo, foram utilizados dois métodos de cálculo disponíveis na literatura: o método proposto por Trintin, João (2024) baseado na teoria do concreto armado no estágio II; e o método proposto por Beber Andriei (2003) que se baseia no equilíbrio das tensões internas para se determinar a resistência no ELU.

4.1 MODELO DE CÁLCULO TRINTIN

O modelo de cálculo proposto por TRINTIN, João (2024), tem como foco o cálculo de reforço com CT para vigas submetidas à flexão. O autor justifica a utilização do estágio II para o dimensionamento fundamentado na execução do reforço, que ocorre após a viga estar sujeita a um carregamento inicial, além disso, deve-se evitar a ocorrência de fissuras na região tracionada em quantidade e espessura superiores às encontradas no estágio II, pois podem favorecer a ruptura precoce na seção na interface entre o concreto antigo e o reforço. A Figura 14 ilustra uma seção transversal reforçada com Concreto Têxtil e seu diagrama indicando as forças resultante de cada material, bem como sua distância de aplicação em relação a linha neutra.

Figura 14 - Diagrama da seção transversal reforçada com CT



Fonte: TRINTIN, João (2024)

O método proposto pelo autor obedece às seguintes hipóteses:

- a) até a ruptura, as seções transversais permanecem planas (hipótese de Bernoulli);
- b) concreto fissurado abaixo da linha neutra, portanto a resistência à tração do concreto é nula (hipótese de Mörsh);
- c) há aderência perfeita entre o aço e o concreto;
- d) há aderência perfeita entre o compósito de reforço e a viga original;
- e) presume-se que a seção se encontra no Estádio II; e
- f) os materiais possuem comportamento linear.

O Modelo de Trintin é baseado nas equações de equilíbrio e na Lei de Hooke que define as tensões em cada material conforme equação 14.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (14)$$

onde:

σ é a tensão em cada material;

E é o módulo de elasticidade de cada material;

ε é a deformação específica de cada material.

Pode-se obter a deformação em cada material baseando-se na hipótese clássica da flexão, logo:

$$\varepsilon = \phi \cdot y \quad (15)$$

onde:

ϕ = curvatura de cada material;

y = distância entre o centro geométrico do material e a posição da linha neutra (x).

A equação de equilíbrio pode ser definida através da Figura 14 de forma que:

$$R_c + R_{s'} = R_s + R_f \quad (16)$$

onde:

R_c é a força resultante no concreto comprimido;

$R_{s'}$ é a força resultante na armadura comprimida;

R_s é a força resultante na armadura tracionada;

R_f é a força resultante no concreto têxtil.

A força resultante em cada material pode ser obtida por:

$$R = \int_A \sigma \cdot dA \quad (17)$$

Como a resistência à tração do concreto é desprezada, a área que contribui para a resistência do concreto estende-se da linha neutra até o ponto mais comprimido. Substituindo as equações 14 e 15 na equação 17, obtém-se:

$$R_c = \int_0^x \sigma_c \cdot b_w \cdot dy = \int_0^x E_c \cdot \phi \cdot b_w \cdot dy = E_c \cdot b_w \cdot \frac{x^2}{2} \quad (18)$$

Já o aço e o têxtil contém forças concentradas, logo suas forças resultantes podem ser definidas como:

$$R_s = E_s \cdot \phi \cdot (d - x) \cdot A_s \quad (19)$$

$$R_{s'} = E_s \cdot \phi \cdot (x - d') \cdot A_{s'} \quad (20)$$

$$R_f = E_f \cdot \phi \cdot (d_f - x) \cdot A_f \quad (21)$$

Ao substituir as resultantes na Equação 16 e considerar que a curvatura dos materiais é constante, a resolução da Equação 22 permite determinar a posição da linha neutra (x), conforme apresentado na Equação 23.

$$\frac{1}{2} \cdot E_c \cdot b_w \cdot x^2 + (A_{s,tot} \cdot E_s + A_f \cdot E_f) \cdot x - (A_{s'} \cdot E_s \cdot d' + A_s \cdot E_s \cdot d + A_f \cdot E_f \cdot d_f) = 0 \quad (22)$$

$$x = \frac{\sqrt{2A_f b_w E_c E_f d_f + (A_{s,tot})^2 E_s^2 + [(A_{s,tot}) A_f E_f + (A_s b_w + A_{s'} d') b_w E_c] 2E_s + A_f^2 E_f^2 - (A_{s,tot}) E_s - A_f E_f}}{b_w E_c} \quad (23)$$

Com a posição da linha neutra definida, é possível se obter a inércia homogeneizada da seção no estágio II através da equação 24 (TRINTIN, João, 2024).

$$I_x = \frac{b_w \cdot x^3}{2} + \frac{E_s}{E_c} \cdot A_s \cdot (d - x)^2 + \frac{E_s}{E_c} \cdot A_{s'} \cdot (x - d')^2 + \frac{E_f}{E_c} \cdot A_f \cdot (df - x)^2 \quad (24)$$

onde:

$A_{s,tot}$ é o somatório da área da armadura tracionada (A_s) e a área da armadura comprimida ($A_{s'}$);

b_w é a dimensão da base da viga;

x é a profundidade da linha neutra;

E_s é o módulo de elasticidade do aço;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

E_f é o módulo de elasticidade do têtil;

d' é a altura útil, ou seja, distância do centro de gravidade da armadura tracionada até a borda mais comprimida;

d' é a distância do centro de gravidade da armadura comprimida até a borda mais comprimida;

df é a distância do centro de gravidade do reforço até a borda mais comprimida.

Com a posição da linha neutra e inércia homogeneizada calculada, é possível encontrar o momento resistente (M_r) através da equação 24, supondo que a tensão no tecido (σ_f) é a máxima resistida pelo material, isto é, é igual a sua tensão de escoamento. (TRINTIN, João, 2024).

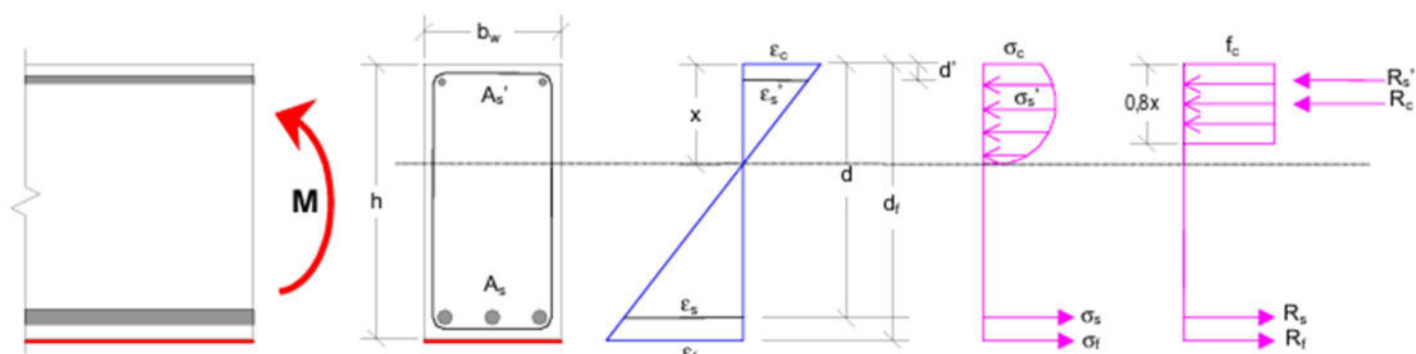
$$M_r = \frac{E_c}{E_f} \cdot \frac{\sigma_f \cdot I_x}{(d_f - x)} \quad (25)$$

4.2 MODELO DE CÁLCULO BEBER

O modelo de cálculo de Beber Andriei (2003), foi proposto, a princípio, para o cálculo de reforço de vigas à flexão com compósitos de fibra de carbono, mas muitos autores nacionais utilizam o método de forma adaptada para cálculo de reforço à flexão com Concreto Têxtil.

O autor do método utiliza a análise no estado limite último (ELU), que permite determinar a resistência da seção transversal, pela combinação do equilíbrio de forças, compatibilidade de deformações e leis constitutivas dos materiais na ruptura. A distribuição de tensão e deformação na seção transversal de uma viga reforçada pode ser observada na Figura 15. (BEBER, Andriei, 2003).

Figura 15 - Diagrama esquemático de equilíbrio da seção transversal reforçada



Fonte: BEBER, Andriei (2003, p.57)

O método considera as seguintes hipóteses básicas:

- até a ruptura, as seções transversais permanecem planas (Hipótese de Bernoulli);
- o encurtamento de ruptura do concreto é de 3,5‰;
- o alongamento máximo permitido para armadura de tração é 10‰;
- a resistência à tração do concreto é desprezada;
- existe aderência perfeita entre o aço e o concreto;

f) existe aderência perfeita entre o reforço e a superfície de concreto.

Diferente do modelo de Trintin, Beber utiliza o retângulo simplificado para calcular a área da força resultante no concreto, desse modo, pode-se então definir a equação de equilíbrio como:

$$\sigma_{s'} \cdot A_{s'} + 0,8 \cdot x \cdot b_w \cdot f_c = \sigma_s \cdot A_s + \sigma_f \cdot A_f \quad (26)$$

Isolando x é possível obter a posição da linha neutra:

$$x = \frac{\sigma_s \cdot A_s + \sigma_f \cdot A_f - \sigma_{s'} \cdot A_{s'}}{0,8 \cdot b_w \cdot f_c} \quad (27)$$

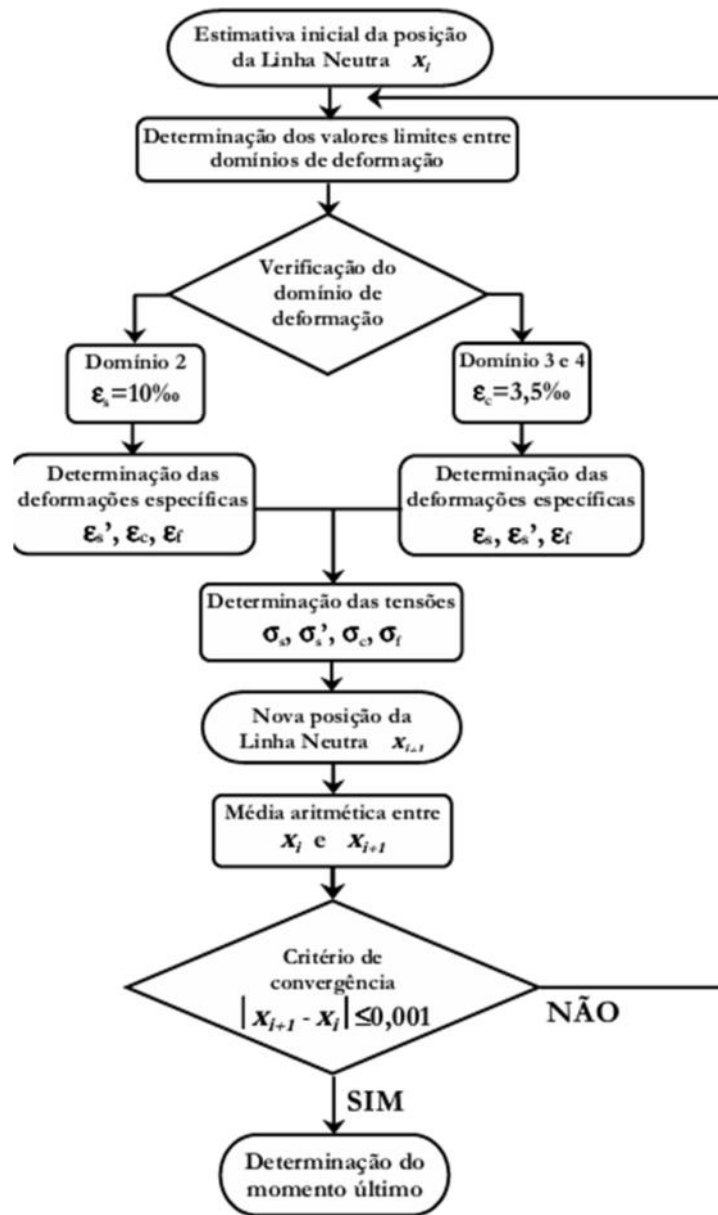
Para obtenção do valor inicial de x , assume-se que as tensões atuantes nos materiais são as máximas suportadas por eles. Com a posição da linha neutra é possível identificar o domínio de deformação no qual se encontra a seção transversal. É importante salientar que a seção deve respeitar os limites de domínios definidos na ABNT NBR 6118(2023) e caso a seção transversal se encontre fora desses domínios, deve-se, então, redimensionar a seção de concreto ou alterar as propriedades dos materiais. (BEBER, Andriei, 2003).

$$\text{Se } x < x_{23} = \frac{0,0035 \cdot d}{0,0035 + \gamma}, \text{ então a seção se encontra no Domínio 2}$$

$$\text{Se } x_{23} < x < x_{lim} = \frac{0,0035 \cdot d}{0,0035 + \gamma}, \text{ então a seção se encontra no Domínio 3}$$

O método propõe que seja realizado um processo iterativo até que os valores de x atendam o critério de convergência de 0,001, conforme ilustra Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma para determinação do momento último da seção



Fonte: BEBER, Andriei (2003)

Os métodos de cálculo das deformações de cada material são definidos por Beber com base na hipótese de Bernoulli e na relação por semelhança de triângulos no diagrama de deformações.

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d-x} \Rightarrow \varepsilon_c = \left(\frac{x}{d-x} \right) \cdot \varepsilon_s \quad (28)$$

$$\frac{\varepsilon_s}{x} = \frac{\varepsilon_{s'}}{x-d'} \Rightarrow \varepsilon_{s'} = \left(\frac{x-d'}{d-x} \right) \cdot \varepsilon_s \quad (29)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d-x} \Rightarrow \varepsilon_s = \left(\frac{d-x}{x} \right) \cdot \varepsilon_c \quad (30)$$

$$\frac{\varepsilon_s}{d-x} = \frac{\varepsilon_f}{df-x} \Rightarrow \varepsilon_f = \left(\frac{df-x}{d-x} \right) \cdot \varepsilon_s \quad (31)$$

A partir da determinação das deformações, se calculam novas tensões baseadas na equação (14) e uma nova posição da linha neutra, repetindo o processo até que se atinja o critério de convergência.

Finalizado o processo, pode-se calcular o momento último da seção (M_u), dado por:

$$M_u = \sigma_s \cdot A_s \cdot d + \sigma_f \cdot A_f \cdot d_f - 0,32 \cdot b_w \cdot f_c \cdot x^2 - \sigma_{s'} \cdot A_{s'} \cdot d' \quad (32)$$

5 MODELAGEM DO ALGORITMO DE CÁLCULO

Os modelos foram elaborados na linguagem de programação *Python* versão 3.13, e foram implementados em um único algoritmo onde o usuário pode definir qual modelo de cálculo escolher com base nas suas especificidades.

5.1 DADOS DE ENTRADA

Inicialmente, solicita-se ao usuário que insira os dados de entrada referente as propriedades geométricas da seção transversal e propriedades mecânicas dos materiais necessários para execução de cada modelo, conforme figuras 17 e 18.

Figura 17 - Coleta de dados para o método de TRINTIN

```
def dados_de_entrada(): 1 usage
    while True:

        # ---- COLETA DOS DADOS ----
        bw = float(input('Digite a largura da viga (bw) em cm: '))
        h = float(input('Digite a altura da viga (h) em cm: '))
        d = float(input('Digite a distância do centro geométrico da armadura tracionada até a borda mais comprimida (d) em cm: '))
        dc = float(input('Digite a distância do centro geométrico da armadura comprimida até a borda mais comprimida (d) em cm: '))
        Ec = float(input('Digite o módulo de elasticidade do concreto (Ec) em GPa: '))
        As = float(input('Digite a área de aço da armadura tracionada (As) em cm²: '))
        Asc = float(input('Digite a área de aço da armadura comprimida (Asc) em cm²: '))
        Ms = float(input('Digite o momento fletor que a viga deve resistir (Ms) em kN·cm: '))
        Es = float(input('Digite o módulo de elasticidade do aço (Es) em GPa: '))
```

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 18 - Coleta de dados para o método de BEBER.

```
def dados_de_entrada(): 1 usage
    while True:

        # ---- COLETA DOS DADOS ----
        bw = float(input('Digite a largura da viga (bw) em cm: '))
        h = float(input('Digite a altura da viga (h) em cm: '))
        d = float(input('Digite a distância do centro geométrico da armadura tracionada até a borda mais comprimida (d) em cm: '))
        dc = float(input('Digite a distância do centro geométrico da armadura comprimida até a borda mais comprimida (d) em cm: '))
        Ec = float(input('Digite o módulo de elasticidade do concreto (Ec) em MPa: '))
        As = float(input('Digite a área de aço da armadura tracionada (As) em cm²: '))
        Asc = float(input('Digite a área de aço da armadura comprimida (Asc) em cm²: '))
        Ms = float(input('Digite o momento fletor que a viga deve resistir (Ms) em kN·cm: '))
        Es = float(input('Digite o módulo de elasticidade do aço (Es) em MPa: '))
        fy = float(input('Digite a tensão de escoamento na armadura tracionada (em MPa): '))
        fyc = float(input('Digite a tensão de escoamento na armadura comprimida (em MPa): '))
        fck = float(input('Digite a resistência característica do concreto (fck) (em MPa): '))
```

Fonte: elaborado pela autora.

5.2 DADOS DO REFORÇO

Com a finalidade de realizar a análise comparativa com os dados experimentais realizados por Nora Juliana (2018), o presente estudo utilizou como base os dados dos têxteis ARMO-mesh L500 e a fibra de vidro brasileira AF - 0200 BR cujos dados foram fornecidos pelo fabricante e pela literatura, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do têxtil

	ARMO-mesh L500	AF - 0200 BR
Material	Fibra de carbono	Fibra de vidro
Módulo de Elasticidade (teórico) (GPa)	240	70
Módulo de Elasticidade (cálculo) (GPa)	160	-
Tensão última (N/mm ²)	4300	1000 (lit)
Tensão de projeto à flexão (MPa)	800	220
Gramatura da fibra na direção principal (g/m ²)	187	85
Densidade da fibra (g/cm ³)	1,78	2,55
Área de uma camada da fibra por centímetro (cm ² /cm)	0,0105	0,0033
Espessura teórica de cálculo (mm)	0,105	0,5

Fonte: elaborado pela autora

Levando em consideração que todos os cálculos foram realizados sem os coeficientes de ponderação das ações e resistências será utilizado o módulo de elasticidade teórico em ambos os casos.

Quanto às tensões, considerando que o modelo de TRINTIN atua no estágio II (regime elástico-linear), sem considerar o escoamento dos materiais, a tensão será limitada a 800MPa para fibra de carbono e 220MPa para fibra de vidro, conforme indicado pelos fabricantes. Esta limitação impede que o modelo teórico superestime a capacidade do elemento reforçado. Já para o método de BEBER, que dimensiona no estado limite último (ELU) e, portanto, considera o escoamento dos materiais, será utilizada a tensão última de ruptura das fibras, visto que o modelo limita a tensão no reforço através da compatibilidade de deformações e do escoamento do aço.

Para a modelagem, foi empregado um sistema de laços de modo a realizar a implementação de um menu de opções ao usuário. Caso seja necessária a utilização de uma fibra distinta, o usuário deverá inserir manualmente as propriedades do material, conforme ilustrado nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Dados do reforço têxtil para o modelo de Trintin (2024) no *Python*

```
def escolher_textil():
    while True:
        print("=" * 50)
        print("DADOS DO REFORÇO TÊXTIL")
        print("=" * 50)

        print('[1] Armo-mesh L500 da S&P')
        print('[2] AF - 0200 BR da FiberTEX')
        print('[3] Outro')
        op = int(input('Escolha a opção de têxtil para o reforço: '))

        if op == 1:
            print("Você escolheu a Armo-mesh L500 da S&P")
            return 240, 0.0105, 800, 0.3, 0.0105, "Armo-mesh L500 da S&P" # Ef(GPa), Af1/cm(cm2/cm), of(MPa), ea(cm), et(cm)

        elif op == 2:
            print("Você escolheu a AF - 0200 BR da FiberTEX")
            return 70, 0.0033, 220, 0.2, 0.05, "AF - 0200 BR da FiberTEX" # Ef(GPa), Af1/cm(cm2/cm), of(MPa), ea(cm), et(cm)

        elif op == 3:
            nome = input("Digite o nome do têxtil: ")
            Ef = float(input('Digite o módulo de elasticidade do têxtil em GPa:'))
            g = float(input('Digite a gramatura da fibra na direção principal em g/m2'))
            p = float(input('Digite a densidade da fibra em g/cm3'))
            Af1 = ((g/10000)/p) # Af1/cm em (cm2/cm)
            ff = float(input('Digite a tensão de escoamento do têxtil em MPa:'))
            ea = float(input('Digite a espessura da argamassa em cm:'))
            et = float(input('Digite a espessura do têxtil em MPa:'))
            return Ef, Af1, ff, ea, et, nome
```

Fonte: elaborado pela autora

Figura 20 - Dados do reforço têxtil para o modelo de Beber (2003) no Python

```
def escolher_textil():
    while True:
        print("=" * 50)
        print("DADOS DO REFORÇO TÊXTEL")
        print("=" * 50)

        print('[1] Armo-mesh L500 da S&P')
        print('[2] AF - 0200 BR da FiberTEX')
        print('[3] Outro')
        op = int(input('Escolha a opção de têxtil para o reforço: '))

        if op == 1:
            print("Você escolheu a Armo-mesh L500 da S&P")
            return 240000, 0.0105, 4300, 0.3, 0.0105, "Armo-mesh L500 da S&P" # Ef(MPa), Af1p/cm (cm2/cm), af (MPa), ea(cm), et (cm)

        elif op == 2:
            print("Você escolheu a AF - 0200 BR da FiberTEX")
            return 70000, 0.003269, 1000, 0.2, 0.05, "AF - 0200 BR da FiberTEX" # Ef(MPa), Af1p/cm (cm2/cm), af (MPa), ea(cm), et (cm)

        elif op == 3:
            nome = input("Digite o nome do têxtil: ")
            Ef = float(input('Digite o módulo de elasticidade do têxtil em MPa:'))
            g = float(input('Digite a gramatura da fibra na direção principal em g/m2'))
            p = float(input('Digite a densidade da fibra em g/cm3'))
            Af1 = ((g / 10000) / p) # Af1/cm em (cm2/cm)
            ff = float(input('Digite a tensão de escoamento do têxtil em MPa:'))
            ea = float(input('Digite a espessura da argamassa em cm:'))
            et = float(input('Digite a espessura do têxtil em cm:'))
            return Ef, Af1, ff, ea, et, nome
```

Fonte: elaborado pela autora

5.3 ALTURA ÚTIL DO REFORÇO

Para calcular a distância do centro de gravidade do reforço até a borda mais comprimida, foi utilizada a análise experimental da autora Nora, Juliana (2018) e o modelo de cálculo original, de modo que:

para o reforço com até 3 camadas foi considerado, por aproximação:

$$d_f = d \quad (33)$$

para reforços com 3 a 6 camadas foi considerado:

$$d_{f3} = h + 2 \cdot e_a + \frac{3}{2} \cdot e_t \quad (34)$$

e para configurações com 6 camadas:

$$d_{f6} = h + \frac{7}{2} \cdot e_a + 3 \cdot e_t \quad (35)$$

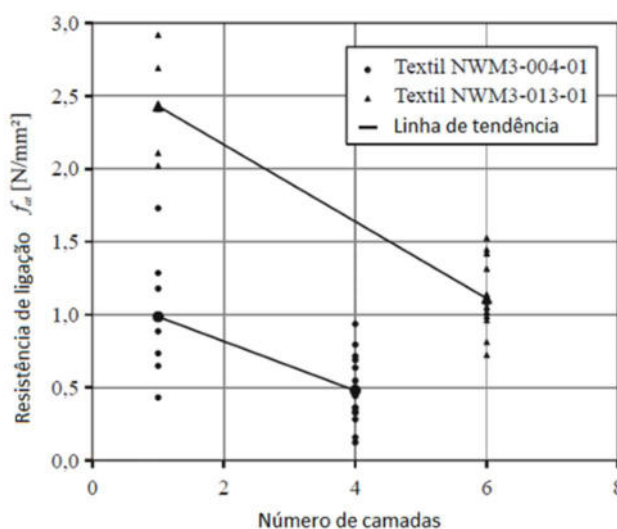
onde,

e_a é a espessura da argamassa, considerada como 2 mm para FiberTex e 3 mm para ArmoMesh;

e_t é a espessura do têxtil, considerada como 0,5 mm para FiberTex e 0,105 mm para ArmoMesh;

O modelo de dimensionamento proposto neste estudo foi limitado a um máximo de seis camadas, considerando que testes experimentais realizados por Ortlepp (2007) indicaram que a camada com menor tensão adesiva irá determinar a falha do sistema, além de reduzir a resistência de ligação, conforme Figura abaixo. (NORA, Juliana, 2018).

Figura 21 - Influência do número de camadas



Fonte: Ortlepp (2007) *apud* NORA Juliana (2018)

Na modelagem do dimensionamento foi utilizado o sistema de laço de modo que, o número de camadas inicia em um e aumenta de forma linear até que o momento resistente seja maior que o momento solicitante, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Dimensionamento pelo método de cálculo I no Python – cálculo do d_f

```
# --- DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO --- #
def dimensionar_reforco(bw, h, d, dc, Ec, As, Asc, Ms, Es, Ef, Af1, ff, ea, et, nome): 1 usage
    camadas = 1
    while True:
        # ---Cálculo da Linha Neutra---#
        if camadas < 3:
            df = h

        elif 3 <= camadas < 6:
            df = h + 2*ea + 1.5*et

        elif camadas == 6:
            df = h + 3.5*ea + 3*et

        else:
            print("\n ⚠ Dimensionamento inviável:")
            print("Mesmo com 6 camadas, o momento resistente não supera o solicitante.")
            return None, None, None, None
```

Fonte: elaborado pela autora

5.4 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO

5.4.1 Modelo de Cálculo TRINTIN

A modelagem baseada no modelo de Trintin (2024), é realizada seguindo todas as equações descritas no item 4, de modo que o algoritmo calcula a posição da linha neutra, a inércia homogeneizada e o momento último e realiza uma verificação entre o momento último e o momento solicitante, que determina se o laço é interrompido ou é adicionada uma camada ao reforço, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Rotina para dimensionamento pelo método de cálculo Trintin no Python

```

Af = Af1 * camadas * bw
a = 0.5 * Ec * bw
b = (Es * (As + Asc)) + (Af * Ef)
c = - ((Es * As * d) + (Asc * dc * Es) + (Af * Ef * df))

x = (-b + math.sqrt(b * b - 4 * a * c)) / (2 * a)

# --- Cálculo do Momento de Inércia ---#
Ix = (bw * x ** 3) / 3 + (Es / Ec) * As * (d - x) ** 2 + (Es / Ec) * Asc * (x - dc) ** 2 + (Ef / Ec) * Af * (df - x) ** 2

# --- Cálculo do Momento Resistente ---#
Mr = (Ec / Ef) * (((ff / 10) * Ix) / (df - x))

if Mr > Ms:
    return x, Ix, Mr, camadas
else:
    camadas += 1

```

Fonte: elaborado pela autora

Os resultados são entregues de forma descritiva com indicação da posição da linha neutra, inércia homogeneizada, momento solicitante, momento resistente e quantidade de camadas do têxtil escolhido, conforme Figura 24 e 25. Dessa forma o projetista tem todos os dados necessários para realizar a análise do dimensionamento.

Figura 24 - Função resultados no Python para modelo de cálculo Trintin

```

def main(): 1 usage
    bw, h, d, dc, Ec, As, Asc, Ms, Es, = dados_de_entrada()
    Ef, Af1, ff, ea, et, nome = escolher_texatil()
    x, Ix, Mr, camadas = dimensionar_reforco(bw, h, d, dc, Ec, As, Asc, Ms, Es, Ef, Af1, ff, ea, et, nome)
    if x is None:
        print("Rever dados de entrada ou material de reforço.")
        return

    print("=" * 50)
    print("RESULTADOS")
    print("=" * 50)
    print(f"Posição da linha neutra (x) = {x:.3f} cm")
    print(f"Momento de Inercia (Ix) = {Ix:.3f} cm^4")
    print(f"Momento Solicitante (Ms) = {Ms:.3f} kN.cm")
    print(f"Momento Resistente (Mr) = {Mr:.3f} kN.cm")
    print(f"O reforço necessário é de {camadas} camadas do concreto têxtil {nome}.")
    print("Programa finalizado!")

if __name__ == "__main__":
    main()

```

Fonte: elaborado pela autora

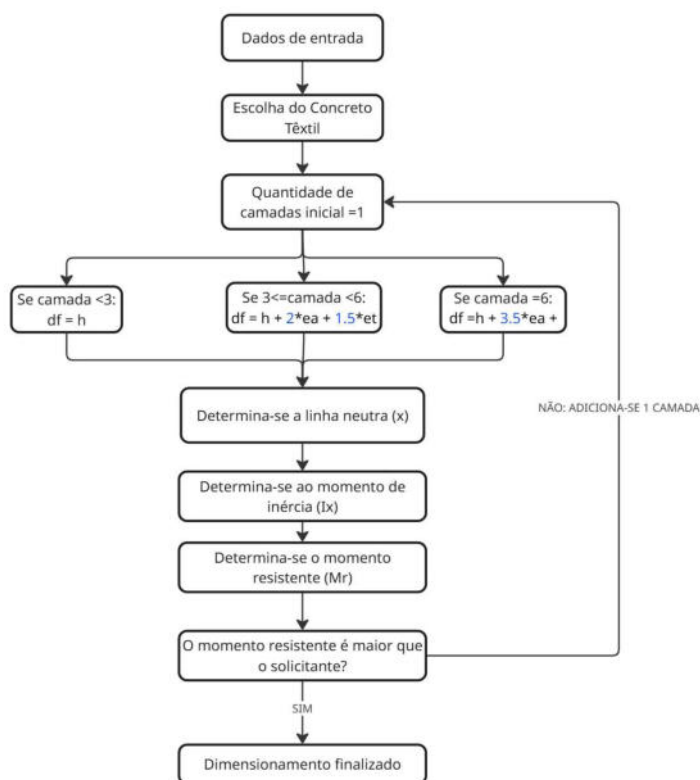
Figura 25 - Ilustração da saída de dados (resultados) para o modelo de cálculo Trintin.

```
=====
RESULTADOS
=====
Posição da linha neutra (x) = 5.948 cm
Momento de Inercia (Ix) = 6097.700 cm^4
Momento Solicitante (Ms) = 2416.700 kN.cm
Momento Resistente (Mr) = 2654.328 kN.cm
  O reforço necessário é de 2 camadas do concreto têxtil Armo-mesh L500 da S&P.
Programa finalizado!
```

Fonte: elaborado pela autora

O fluxograma ilustrado na Figura 26 demonstra os processos de cálculo utilizados no programa computacional.

Figura 26 - Fluxograma Modelo de Trintin



Fonte: elaborado pela autora

O código completo está descrito no Apêndice B,

5.4.2 Modelo de Cálculo BEBER

Assim como no método de TRINTIN, a função de dimensionamento do algoritmo funciona com um laço que inicia com uma camada e aumenta linearmente quando o momento resistente não atinge o solicitante. A priori é calculado o d_f de acordo com a quantidade de camadas, definidos as deformações normativas do concreto e aço conforme hipóteses básicas e os limites de domínios, conforme Figura 27.

Figura 27 – Rotina para Dimensionamento de reforço por BEBER.

```
def dimensionar_reforco(bw, h, d, dc, Ec, As, Asc, Ms, Es, fy, fyc, fck, Ef, Af1, ff, ea, et, nome): 1 usage
    camadas = 1
    while True:
        # ---Cálculo de df---#
        if camadas < 3:
            df = h

        elif 3 <= camadas < 6:
            df = h + 2 * ea + 1.5 * et

        elif camadas == 6:
            df = h + 3.5 * ea + 3 * et

        else:
            print("\n ⚠ Dimensionamento inviável:")
            print("Mesmo com 6 camadas, o momento resistente não supera o solicitante.")
            return None, None, None, None, camadas, nome

        # Deformações normativas
        eps_ca = 0.0035
        eps_si = 0.010

        # =====
        # LIMITES DE DOMÍNIO
        # =====

        x23 = 0.259 * d
        eps_yd = (fy / 1.15) / Es
        xlim = (0.0035 / (0.0035 + eps_yd)) * d
```

Fonte: elaborado pela autora

Com os limites definidos, o cálculo prossegue conforme exemplificado por Beber (2003), com a determinação da linha neutra por iteração.

No algoritmo, o processo iterativo é limitado a 100 repetições por segurança computacional, considerando que a não convergência em um número reduzido de iterações pode indicar divergências matemáticas ou seções fisicamente inviáveis. Esse limite evita travamentos (*loops* infinitos), interrompendo a execução e notificando o usuário sobre a falha.

Obedecendo aos limites normativos, ao final da iteração é verificado a posição da linha neutra quanto ao limite do Domínio 3, evitando a ruptura frágil do elemento estrutural, conforme ilustrado nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 – Rotina de determinação da linha neutra por BEBER no Python

```
# =====
# ESTIMATIVA INICIAL (tensões máximas)
# =====
Af = Af1 * bw * camadas
x = (fy * As + ff * Af - fyc * Asc) / (0.8 * bw * 0.85*(fck/1.4))

# =====
# DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA NEUTRA
# =====
tol = 1e-4
max_iter = 100
for i in range(max_iter):
    x_old = x

    # ---- Verificação do domínio ----
    if x < x23:
        dominio = 2
        eps_s = eps_si
        eps_c = (x / (d - x)) * eps_s

    else: # Se for maior que x23, usa a geometria do Domínio 3 e 4
        dominio = 3
        eps_c = eps_ca
        eps_s = ((d - x) / x) * eps_c

    eps_sc = ((x - dc) / (d - x)) * eps_s
    eps_f = ((df - x) / (d - x)) * eps_s
```

Fonte: elaborado pela autora

Figura 29 – Rotina de determinação da linha neutra por BEBER no Python

```

# ---- Tensões ----
sigma_s = min(Es * eps_s, fy)
sigma_sc = max(min(Es * eps_sc, fyc), -fy)
sigma_f = min(Ef * eps_f, ff)
sigma_c = 0.85*(fck/1.4)

# ---- Novo x pelo equilíbrio ----
x_calc = (sigma_s * As + sigma_f * Af - sigma_sc * Asc) / (0.8 * bw * sigma_c)

# ---- Critério de convergência ----
if abs(x_calc - x_old) <= tol:
    x = x_calc
    break
x = 0.5 * (x_old + x_calc)
else:
    print("Não convergiu")

# =====
# VERIFICAÇÃO FINAL DE DOMÍNIO 4
# =====
if x > xlim:
    print("\nX Seção em Domínio 4.")
    print(f"Linha neutra final ({x:.2f} cm) ultrapassou o limite ({xlim:.2f} cm).")
    print("O reforço têxtil não é admissível para esta configuração.")
    return None, None, None, None, camadas, nome

```

Fonte: elaborado pela autora

Após a iteração e determinação da linha neutra é determinado o momento último conforme equação 30 e realizada a comparação entre o momento encontrado e o momento solicitante, verificando se o laço deve ser interrompido ou se deve ser adicionado uma camada ao reforço.

Figura 30 - Rotina para determinação do momento último

```

# =====
# DETERMINAÇÃO DO MOMENTO ÚLTIMO
# =====

Mu = ((sigma_s*0.1) * As * d + (sigma_f*0.1) * Af * df - 0.32 * bw * (sigma_c*0.1) * x ** 2 - (sigma_sc*0.1) * Asc * dc )
# Conversão: MPa → kN/cm² (1 MPa = 0.1 kN/cm²)
if Mu >= Ms:
    return dominio, x, Ms, Mu, camadas, nome
else:
    camadas += 1

```

Fonte: elaborado pela autora

Assim como no modelo I, os resultados são entregues de forma descritiva com indicação do domínio, da posição da linha neutra, momento solicitante, momento

último e quantidade de camadas do têxtil escolhido, de forma que o projetista tenha todos os dados necessários para realizar a análise do dimensionamento.

Figura 31 - Função resultados no modelo de cálculo II

```
def main(): 1 usage
    bw, h, d, dc, Ec, As, Asc, Ms, Es, fy, fyc, fck = dados_de_entrada()
    Ef, Af1, ff, ea, et, nome = escolher_textil()
    dominio, x, Ms, Mu, camadas, nome = dimensionar_reforco(bw, h, d, dc, Ec, As, Asc, Ms, Es, fy, fyc, fck, Ef, Af1, ff, ea, et, nome)
    if x is None:
        print("Rever dados de entrada ou material de reforço.")
        return

    # =====
    # RESULTADOS
    # =====
    print("\n * 50")
    print("RESULTADOS")
    print("\n * 50")
    print(f"A viga se encontra no domínio = {dominio}")
    print(f"Posição da linha neutra (x) = {x:.3f} cm")
    print(f"Momento Solicitante (Ms) = {Ms:.3f} Kn.cm")
    print(f"Momento Resistente (Mr) = {Mu:.3f} Kn.cm")
    print(f"O reforço necessário é de {camadas} camadas do concreto têxtil {nome}.")
    print("Programa finalizado!")

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Fonte: elaborado pela autora

Figura 32 – Saída de dados (resultados) no modelo de cálculo Beber.

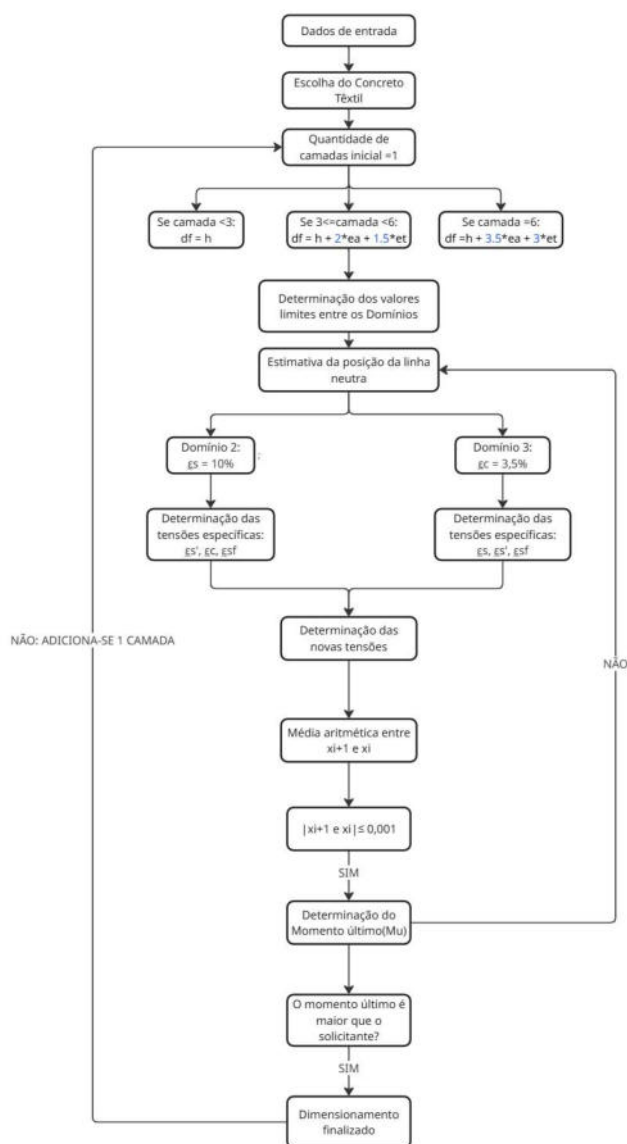
```
=====
RESULTADOS
=====
A viga se encontra no domínio = 2
Posição da linha neutra (x) = 5.666 cm
Momento Solicitante (Ms) = 2416.700 kN.cm
Momento Resistente (Mr) = 2996.070 kN.cm
    O reforço necessário é de 1 camadas do concreto têxtil Armo-mesh L500 da S&P.
Programa finalizado!
```

Fonte: elaborado pela autora

Para facilitar o uso e atualizações do programa computacional, os dois modelos de cálculo foram implementados em um único arquivo de forma que o usuário pode definir qual modelo se adapta melhor a realidade do projeto ou comparar os dois resultados.

O fluxograma ilustrado na Figura 33 demonstra os processos de cálculo utilizados no programa computacional.

Figura 33 - Fluxograma Modelo de Beber



Fonte: elaborado pela autora

O código completo pode ser observado no Apêndice B.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de comparar os métodos expostos nos itens 4.1 e 4.2 com os experimentos realizados por NORA Juliana (2018), foram executados testes no algoritmo de cálculo com os dados da viga utilizada com diferentes tipos aplicações de reforços. Os dados utilizados podem ser encontrados na tabela abaixo.

Tabela 3 - Dados da viga de referência ensaiada por Nora (2018)

Propriedades geométricas	
bw (cm)	7
h (cm)	14
d (cm)	11,18
d'(cm)	2,63
Propriedades do aço	
As (cm ²)	1,01
As' (cm ²)	0,277
σ_s (MPa)	500
$\sigma_{s'}$ (MPa)	600
Propriedades do concreto	
fck1 (MPa)	31,51
Ec1 (GPa)	34,34
fck2 (MPa)	25,99
Ec2 (GPa)	28,55

Fonte: Adaptada de Nora (2018).

Nesta etapa, procedeu-se à análise de seis vigas ensaiadas experimentalmente por Nora (2018). O estudo contemplou duas vigas reforçadas com três camadas do têxtil de carbono Armo-mesh L500 (3-AM-C-1 e 3-AM-C-2), duas vigas com três camadas do têxtil de vidro AF-0200 BR (3-FT-S-1 e 3-FT-S-2) e duas vigas com seis camadas deste mesmo material de vidro (6-FT-S-1 e 6-FT-S-2). Os valores da carga de ruptura obtidos em laboratório foram comparados com as previsões teóricas geradas pelo algoritmo computacional, utilizando-se os modelos analíticos de Trintin (Tabela 4) e de Beber (Tabela 5). Além disso, a Tabela 6 ilustra a diferença numérica entre os dois métodos para as diferentes vigas analisadas.

Tabela 4 - Análise comparativa Experimental x TRINTIN (2024)

	Experimental (kN)	Modelo de TRINTIN (kN)	Diferença
3-AM-C-1	46,41	37,795	19%
3-AM-C-2	49,83	37,421	25%
3-FT-S-1	38,33	25,940	32%
3-FT-S-2	37,28	25,664	31%
6-FT-S-1	39,49	26,160	34%
6-FT-S-2	39,82	25,87	35%

Fonte: Elaborado pela autora

A análise comparativa entre o modelo de cálculo I (Trintin) e os resultados experimentais demonstraram que todos os valores teóricos se situaram abaixo dos valores experimentais de ruptura. Os valores mais próximos foram observados nos modelos com fibra de carbono e os mais divergentes nas vigas com seis camadas. Esse comportamento pode-se justificar pela limitação das tensões dos materiais no Estádio II (elástico-linear) e pela variação na altura útil do reforço (d_f), já que em seções com elevado número de camadas, o efeito do escorregamento entre as fibras pode acentuar a diferença entre o comportamento elástico linear e a ruptura real.

Tabela 5 - Análise comparativa Experimental x BEBER (2003)

	Experimental (kN)	Modelo BEBER (kN)	Diferença
3-AM-C-1	46,41	53,15	-15%
3-AM-C-2	49,83	52,53	-5%
3-FT-S-1	38,33	31,75	17%
3-FT-S-2	37,28	30,39	18%
6-FT-S-1	39,49	35,57	10%
6-FT-S-2	39,82	33,58	16%

Fonte: Elaborado pela autora

Em relação a análise com o modelo de cálculo II(Beber) pode-se observar uma proximidade maior entre os valores experimentais e teóricos. Para as vigas reforçadas com fibra de carbono o modelo prevê valores de ruptura superiores aos experimentais, apesar disso, foi mantida a diferença menor que 15% entre os resultados. Essa diferença pode ser justificada pelas hipóteses do método, que assume a aderência perfeita entre o reforço e o substrato até a ruína, condição que não ocorre integralmente na prática, o qual pode ser minimizado por coeficientes de segurança.

Por outro lado, as fibras de vidro possuem um módulo de elasticidade consideravelmente menor (70GPa) o que proporciona ao sistema maior ductilidade ao sistema. Como o método é limitado pelas as deformações normativas do aço (10‰), o potencial de alongamento da fibra de vidro é restringido na teoria, o que justificaria a obtenção de resultados maiores na prática. Ademais, é possível observar que ao aumentar a quantidade de camadas, e consequentemente a resistência da fibra, os valores teóricos se aproximam dos valores experimentais.

Tabela 6 - Análise TRINTIN (2024) x BEBER (2003)

	Modelo de TRINTIN (kN)	Modelo BEBER (kN)	Diferença
3-AM-C-1	37,795	53,15	41%
3-AM-C-2	37,421	52,53	40%
3-FT-S-1	25,940	31,75	22%
3-FT-S-2	25,664	30,39	18%
6-FT-S-1	26,160	35,57	36%
6-FT-S-2	25,87	33,58	30%

Fonte: Elaborado pela autora

É possível observar uma variação expressiva entre os métodos estudados, principalmente no que tange as vigas com fibras de carbono. Isso pode ser justificado pelas premissas fundamentais de cada metodologia, principalmente no fato que o Modelo Trintin utiliza como base o comportamento elástico-linear dos materiais, ou seja, limita a resistência antes do escoamento dos materiais, o que em alguns casos, pode garantir a segurança contra o descolamento prematuro, enquanto o modelo II permite levar o sistema até seus limites normativos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste estudo permitiu constatar o potencial crescente do Concreto Têxtil (CT) como uma solução inovadora para a recuperação de estruturas. Graças à sua elevada resistência, ductilidade, facilidade de aplicação e baixa interferência na geometria original das vigas, o CT consolida-se como um material promissor não só para a terapia de manifestações patológicas, mas também para o desenvolvimento de novas estruturas.

No que tange aos modelos de cálculos estudados, observou-se que a metodologia proposta por Beber apresentou uma excelente correlação com os resultados experimentais, inclusive para fibras de vidro, posicionando-se como uma base sólida para o dimensionamento desse tipo de reforço. Em contrapartida, o modelo de Trintin demonstrou um comportamento mais conservador, o que, embora resulte em margens de segurança maiores, pode levar a dimensionamentos menos otimizados.

Um ponto de destaque foi o desempenho da fibra nacional, que se mostrou bastante eficiente nos cenários analisados. Este resultado é fundamental, pois sinaliza um caminho viável para a ampliação de estudos experimentais no país e a redução de custos para a indústria brasileira de reforços estruturais.

Quanto à ferramenta computacional desenvolvida em Python, o algoritmo cumpriu com êxito o papel de facilitar a análise comparativa entre os métodos de cálculo de forma ágil e prática. Sua estrutura modular permite que o programa seja facilmente adaptado ou atualizado à medida que novos estudos sejam realizados quanto as propriedades dos materiais e novas diretrizes de dimensionamento surjam na literatura técnica.

Por fim, percebe-se que o caminho para a padronização do dimensionamento do Concreto Têxtil ainda depende de um maior volume de ensaios experimentais. É nítida a necessidade de pesquisas que aprofundem o conhecimento sobre as propriedades de fibras nacionais e internacionais de diferentes materiais, afim de aproximar os resultados teóricos dos experimentais, bem como estudos que validem o comportamento de vigas sob variadas camadas de reforço, garantindo assim uma base de dados estatística necessária para uma futura normatização nacional.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Além da ampliação da base de dados experimentais seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Ampliação do programa computacional para o dimensionamento ao esforço cortante;
- Estudo e Implementação no código Python da análise no Estado Limite de Serviço (ELS) quanto a abertura de fissuras e flechas em estruturas reforçadas com Concreto Têxtil;
- Otimização de custos: implementação de um módulo que faça com que programa que escolha a fibra no lugar do usuário com base no custo benefício do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADORNO, F. V.; DIAS, F. O.; SILVEIRA, J. C. O. Recuperação e reforço de vigas de concreto armado. 2015. 70 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

ARAÚJO, José Milton de. Curso de concreto armado. 5. ed. Rio Grande: Editora Dunas, 2023. v. 1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BASTOS, Paulo Sérgio. Fundamentos do concreto armado. UNESP, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Flexão Normal Simples em Vigas de Concreto Armado. UNESP, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2015.

BEBER, Andriei José. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono. 2003. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BOLINA, Fabrício; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. Patologia das Construções. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado. 4. ed. São Carlos: EDUFSCar, 2019.

FIBERTEX. Catálogo Geral: Tecendo Tecnologia. Louveira, SP. Disponível em: <https://www.fibertex.com.br/>.

FIBERTEX. Telas de Fibra de Vidro Estrutural. Disponível em: <https://fibertex.com.br/>.

FUSCO, Péricles Brasiliense. Estruturas de Concreto Armado: Fundamentos do Projeto Estrutural. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil; Ed. da Universidade de São Paulo, 1977. v. 1.

GOMIDE, Tito Lívio Ferreira et al. (Coords.). Manual de Engenharia Diagnóstica: Desempenho, Manifestações Patológicas e Perícias na Construção Civil. 2. ed. São Paulo: Leud, 2020.

HEGGER, Josef et al. Design Models for Textile Reinforced Concrete Structures. Structural Engineering International, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 132-136, maio 2008.

HEGGER, Josef et al. Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. In: PROCEEDINGS OF THE 2nd INTERNATIONAL FED CONGRESS. Anais... Naples, Italy, 2006. p. 1-12.

NORA, Juliana Berteli. Análise experimental do Concreto Têxtil como reforço à flexão de vigas de concreto armado. 2018. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

OLIVEIRA, D. R. B. Análise experimental do Concreto Têxtil como reforço à flexão de vigas de concreto armado. 2019. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

ORTLEPP, Regine. Verbundverhalten von textildbewehrten Verstärkungsschichten aus Beton. 2007. 182 f. Dissertation (Doktor-Ingenieurs) – Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, Dresden, 2007.

ORTOLAN, Vinicius de Kayser et al. Análise do reforço têxtil produzido no Brasil para produção do concreto têxtil. Concreto & Construções, São Paulo, ed. 100, p. 58-63, out./dez. 2020.

PELED, A.; MOBASHER, B.; BENTUR, A. Textile Reinforced Concrete. Boca Raton: CRC Press, 2017. (Modern Concrete Technology, 19).

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. Introdução. In: PINHEIRO, Libânio M. Fundamentos do concreto e projeto de edifícios. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2007. Cap. 1.

S&P CLEVER REINFORCEMENT. S&P ARMO-mesh®: Malha de reforço em fibra de carbono. Portugal, 2023. Disponível em: <https://www.sp-reinforcement.pt/>.

SILVA, Tatiana Aparecida Lúcia da. Concreto reforçado com têxtil: análise do comportamento mecânico e aplicações. 2017. 65 f. Monografia (Especialização em Estruturas de Concreto Armado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

TRINTIN, João Vitor da Silva. Proposta de um modelo teórico de cálculo para reforços à flexão em vigas usando o concreto têxtil. In: I SIMPÓSIO REGIONAL DE ENGENHARIA, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12805869>.

APÊNDICE A – MANUAL DO PROGRAMA DE DIMENSIONAMENTO

Este manual tem como objetivo orientar o usuário na utilização do algoritmo desenvolvido para o dimensionamento de reforço à flexão em vigas de concreto armado com Concreto Têxtil (CT). A ferramenta foi integralmente escrita na linguagem de programação Python, utilizando a biblioteca nativa math para a execução das operações matemáticas.

O programa foi projetado para ser versátil e de fácil execução, não exigindo interfaces gráficas complexas para o seu funcionamento. O usuário pode operar o algoritmo diretamente através do Prompt de Comando (CMD) do Windows, ou por meio de terminais de visualização integrados em ambientes de desenvolvimento (IDEs), como o VS Code, PyCharm ou o próprio terminal interativo do Python.

Para o correto funcionamento, o usuário deve seguir o fluxo de entrada de dados solicitado pelo console, garantindo que as unidades de medida estejam em conformidade com as solicitações do código para a obtenção de resultados corretos, o programa foi modelado para aceitar números decimais com vírgula ou ponto afim de evitar erros, conforme exemplo ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - Exemplo: dados de entrada

```
===== DADOS DE ENTRADA =====
Digite a largura da viga (bw) em cm: 14
Digite a altura da viga (h) em cm: 30
Digite a distância do centro geométrico da armadura tracionada até a borda mais comprimida (d) em cm: 25
Digite a distância do centro geométrico da armadura comprimida até a borda mais comprimida (d) em cm: 5
Digite a área de aço da armadura tracionada (As) em cm²: 1.57
Digite a área de aço da armadura comprimida (Asc) em cm²: 1.01
Digite o momento fletor que a viga deve resistir (Ms) em kN·cm: 2416.7
Digite o módulo de elasticidade do concreto (Ec) em GPa: 31,47
Digite o módulo de elasticidade do aço (Es) em GPa: 210
Digite a tensão de escoamento na armadura tracionada (em MPa): 500
Digite a tensão de escoamento na armadura comprimida (em MPa): 600
Digite a resistência característica do concreto (fck) (em MPa): 30
```

Fonte: elaborado pela autora.

Após a inserção dos dados o modelo mostrará todos valores digitados solicitando a confirmação do usuário de modo que caso haja algum erro o usuário possa corrigir, conforme ilustra a Figura 35.

Figura 35 - Exemplo: dados de entrada II

```

=====
RESUMO DOS DADOS INSERIDOS
=====
bw  = 14.0 cm
h   = 30.0 cm
d   = 25.0 cm
dc  = 5.0 cm
As  = 1.57 cm2
Asc = 1.01 cm2
Ms  = 2416.7 kN.cm
Ec  = 31.47 GPa
Es  = 210.0 GPa
fy  = 500.0 MPa
fyc = 600.0 MPa
fck = 30.0 MPa
=====

Os dados estão corretos? (s/n): sim
-----

```

Fonte: elaborado pela autora.

Com os dados de entrada definidos o usuário poderá definir qual modelo de cálculo pretende utilizar ou se prefere obter os dois resultados e compará-los, conforme Figura 36. Caso o usuário opte por um dos métodos deverá escolher a opção de têxtil e terá os resultados como ilustrados nas Figuras 25 e 32.

Figura 36 - Exemplo: menu principal

```

=====
MENU PRINCIPAL
=====
[1] Calcular pelo Método de TRINTIN
[2] Calcular pelo Método de BEEBER
[3] Calcular pelos DOIS e comparar
[0] Sair
=====
Escolha uma opção: |

```

Fonte: elaborado pela autora.

Para a terceira opção deve-se escolher um têxtil para cada modelo e o resultado será obtido na forma de tabela conforme Figura 37.

Figura 37 - Exemplo: tabela comparativa

```

--- MÉTODO TRINTIN ---
=====
DADOS DO REFORÇO TÊXTIL PARA O MÉTODO TRINTIN
=====
[1] Armo-mesh L500 da S&P
[2] AF - 0200 BR da FiberTEX
[3] Outro
Escolha a opção de têxtil para o reforço: 1
Você escolheu a Armo-mesh L500 da S&P

--- MÉTODO BEEBER ---
=====
DADOS DO REFORÇO TÊXTIL PARA O MÉTODO BEBER
=====
[1] Armo-mesh L500 da S&P
[2] AF - 0200 BR da FiberTEX
[3] Outro
Escolha a opção de têxtil para o reforço: 1
Você escolheu a Armo-mesh L500 da S&P

=====
TABELA COMPARATIVA
=====

```

Método	Têxtil	x (cm)	Momento (kN.cm)	Camadas
Trintin	Armo-mesh L500 da S&P	5.95	2654.28	2
Beeber	Armo-mesh L500 da S&P	6.25	3469.00	1

```

=====

```

Fonte: elaborado pela autora.

Ao final o usuário poderá escolher se deseja retornar ao menu principal e recalculer ou sair do programa, conforme Figura 38.

Figura 38 - exemplo: Encerramento do programa

```

=====
[1] Voltar ao menu principal
[0] Sair do programa
=====
Escolha: 0

Encerrando o programa...
Obrigada!

```

Fonte: elaborado pela autora.

APÊNDICE B – CÓDIGO COMPLETO

Abaixo apresenta-se o código desenvolvido em linguagem Python para o dimensionamento de vigas reforçadas com concreto têxtil

```
import math

def cabecalho():
    print("=" * 70)
    print("CÁLCULO DE REFORÇO COM CONCRETO TÊXTIL - VIGA SUBMETIDA À FLEXÃO")
    print("UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE")
    print("Aluna: Agatha Ferreira Oliveira")
    print("Orientador: Emerson Figueiredo")
    print("=" * 70)

# =====
# ===== ENTRADA DE DADOS =====
# =====

def ler_dados(mensagem):
    while True:
        try:
            entrada = input(mensagem).replace(",", ".").strip()
            valor = float(entrada)
            return valor
        except ValueError:
            print("⚠ Entrada inválida! Digite apenas números.")

def entrada_dados():
    while True:
        print("\n===== DADOS DE ENTRADA =====")
        bw = ler_dados('Digite a largura da viga (bw) em cm: ')
        h = ler_dados('Digite a altura da viga (h) em cm: ')
        d = ler_dados('Digite a distância do centro geométrico da armadura tracionada até a borda mais comprimida (d) em cm: ')
        dc = ler_dados('Digite a distância do centro geométrico da armadura comprimida até a borda mais comprimida (d) em cm: ')
        As = ler_dados('Digite a área de aço da armadura tracionada (As) em cm²: ')
        Asc = ler_dados('Digite a área de aço da armadura comprimida (Asc) em cm²: ')
        Ms = ler_dados('Digite o momento fletor que a viga deve resistir (Ms) em kN·cm: ')

        # Propriedades mecânicas (em MPa)
        Ec = ler_dados('Digite o módulo de elasticidade do concreto (Ec) em GPa: ')
        Es = ler_dados('Digite o módulo de elasticidade do aço (Es) em GPa: ')
        fy = ler_dados('Digite a tensão de escoamento na armadura tracionada (em MPa): ')
        fyc = ler_dados('Digite a tensão de escoamento na armadura comprimida (em MPa): ')
        fck = ler_dados('Digite a resistência característica do concreto (fck) (em MPa): ')

        # ----- MOSTRAR RESUMO -----
        print("\n" + "=" * 50)
```

```

print("RESUMO DOS DADOS INSERIDOS")
print("=" * 50)
print(f"bw  = {bw} cm")
print(f"h   = {h} cm")
print(f"d   = {d} cm")
print(f"dc  = {dc} cm")
print(f"As  = {As} cm²")
print(f"Asc = {Asc} cm²")
print(f"Ms  = {Ms} kN.cm")
print(f"Ec  = {Ec} GPa")
print(f"Es  = {Es} GPa")
print(f"fy  = {fy} MPa")
print(f"fyc = {fyc} MPa")
print(f"fck = {fck} MPa")
print("=" * 50)

confirma = input("\nOs dados estão corretos? (s/n): ")
confirm = confirma.lower().strip()

if confirma.startswith('s'):
    return bw, h, d, dc, As, Asc, Ms, Ec, Es, fy, fyc, fck
else:
    print("\n❌ Refaça a entrada dos dados...\n")

# =====
# ===== MÉTODO TRINTIN =====
# =====
def escolher_textil_trintin():

    # --- ESCOLHA DO TÊXTIL --- #

    while True:
        print("=" * 50)
        print("DADOS DO REFORÇO TÊXTIL PARA O MÉTODO TRINTIN")
        print("=" * 50)

        print('[1] Armo-mesh L500 da S&P')
        print('[2] AF - 0200 BR da FiberTEX')
        print('[3] Outro')

        op = int(input('Escolha a opção de têxtil para o reforço: '))

        if op == 1:
            print("Você escolheu a Armo-mesh L500 da S&P")
            return 240, 0.0105, 800, 0.3, 0.0105, "Armo-mesh L500 da S&P"
            # Ef(GPa), Af1/cm(cm2/cm), σf(MPa), ea(cm), et(cm)

        elif op == 2:
            print("Você escolheu a AF - 0200 BR da FiberTEX")
            return 70, 0.0033, 220, 0.2, 0.05, "AF - 0200 BR da FiberTEX"
            # Ef(GPa), Af1/cm(cm2/cm), σf(MPa), ea(cm), et(cm)

        elif op == 3:
            nome = input("Digite o nome do têxtil: ")
            Ef = float(input('Digite o módulo de elasticidade do têxtil em
GPa: '))

```

```

        g = float(input('Digite a gramatura da fibra na direção
principal em g/m2'))
        p = float(input('Digite a densidade da fibra em g/cm3'))
        Af1 = ((g / 10000) / p) # Af1/cm em (cm2/cm)
        ff = float(input(' Digite a tensão de escoamento do têxtil em
MPa:'))

        ea = float(input('Digite a espessura da argamassa em cm:'))
        et = float(input(' Digite a espessura do têxtil em MPa:'))
        return Ef, Af1, ff, ea, et, nome

    else:
        print("Opção inválida!")
        continue

def metodo_trintin(dados):
    bw, h, d, dc, As, Asc, Ms, Ec, Es, fy, fyc, fck = dados
    Ef, Af1, ff, ea, et, nome = escolher_textil_trintin()

    camadas = 1
    while True:

        # ---Cálculo da Linha Neutra---#
        if camadas < 3:
            df = h

        elif 3 <= camadas < 6:
            df = h + 2 * ea + 1.5 * et

        elif camadas == 6:
            df = h + 3.5 * ea + 3 * et

        else:
            print("\n⚠ Dimensionamento inviável:")
            print("Mesmo com 6 camadas, o momento resistente não supera o
solicitante.")
            return None, None, None, None

        Af = Af1 * camadas * bw

        a = 0.5 * Ec * bw
        b = (Es * (As + Asc)) + (Af * Ef)
        c = - ((Es * As * d) + (Asc * dc * Es) + (Af * Ef * df))

        x = (-b + math.sqrt(b * b - 4 * a * c)) / (2 * a)

        Ix = (bw*x**3)/3 + (Es/Ec)*As*(d-x)**2 + (Es/Ec)*Asc*(x-dc)**2 +
(Ef/Ec)*Af*(df-x)**2

        Mr = (Ec/Ef)*(((ff/10)*Ix)/(df-x))

        if Mr >= Ms:
            return x, Ix, Mr, camadas, nome

        camadas += 1

# =====
# ===== MÉTODO BEEBER =====
# =====

```

```

def escolher_textil_beber():

    # --- ESCOLHA DO TÊXTIL --- #

    while True:
        print("=" * 50)
        print("DADOS DO REFORÇO TÊXTIL PARA O MÉTODO BEBER")
        print("=" * 50)

        print('[1] Armo-mesh L500 da S&P')
        print('[2] AF - 0200 BR da FiberTEX')
        print('[3] Outro')

        op = int(input('Escolha a opção de têxtil para o reforço: '))

        if op == 1:
            print("Você escolheu a Armo-mesh L500 da S&P")
            return 240000, 0.0105, 4300, 0.3, 0.0105, "Armo-mesh L500 da S&P" # Ef(MPa), Aflp/cm (cm2/cm),  $\sigma_f$  (MPa), ea(cm), et (cm)

        elif op == 2:
            print("Você escolheu a AF - 0200 BR da FiberTEX")
            return 70000, 0.003269, 1000, 0.2, 0.05, "AF - 0200 BR da FiberTEX" # Ef(MPa), Aflp/cm (cm2/cm),  $\sigma_f$  (MPa), ea(cm), et (cm)

        elif op == 3:
            nome = input("Digite o nome do têxtil: ")
            Ef = float(input('Digite o módulo de elasticidade do têxtil em MPa:'))
            g = float(input('Digite a gramatura da fibra na direção principal em g/m2'))
            p = float(input('Digite a densidade da fibra em g/cm3'))
            Afl = ((g / 10000) / p) # Afl/cm em (cm2/cm)
            ff = float(input(' Digite a tensão de escoamento do têxtil em MPa:'))
            ea = float(input('Digite a espessura da argamassa em cm:'))
            et = float(input(' Digite a espessura do têxtil em MPa:'))
            return Ef, Afl, ff, ea, et, nome

        else:
            print("Opção inválida!")
            continue

def metodo_beeber(dados):

    bw, h, d, dc, As, Asc, Ms, Ec, Es, fy, fyc, fck = dados
    Ef, Afl, ff, ea, et, nome = escolher_textil_beber()

    # Conversão GPa → MPa
    Ecb = Ec * 1000
    Esb = Es * 1000
    Efb = Ef * 1000

    camadas = 1

    while True:
        # ---Cálculo de df --- #

```

```

if camadas < 3:
    df = h

elif 3 <= camadas < 6:
    df = h + 2 * ea + 1.5 * et

elif camadas == 6:
    df = h + 3.5 * ea + 3 * et

else:
    print("\n⚠ Dimensionamento inviável:")
    print("Mesmo com 6 camadas, o momento resistente não supera o solicitante.")
    return None, None, None, None, camadas, nome

# Deformações normativas
eps_ca = 0.0035
eps_si = 0.010

# =====
# LIMITES DE DOMÍNIO
# =====

x23 = 0.259 * d
eps_yd = (fy / 1.15) / Esb
xlim = (0.0035 / (0.0035 + eps_yd)) * d

# =====
# ESTIMATIVA INICIAL (tensões máximas)
# =====
Af = Af1 * bw * camadas
x = (fy * As + ff * Af - fyc * Asc) / (0.8 * bw * 0.85 * (fck /
1.4))

# =====
# DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA NEUTRA
# =====
tol = 1e-4
max_iter = 100
for i in range(max_iter):
    x_old = x

    # ---- Verificação do domínio ----
    if x < x23:
        dominio = 2
        eps_s = eps_si
        eps_c = (x / (d - x)) * eps_s

    else: # Se for maior que x23, usa a geometria do Domínio 3 e

        dominio = 3
        eps_c = eps_ca
        eps_s = ((d - x) / x) * eps_c

    eps_sc = ((x - dc) / (d - x)) * eps_s
    eps_f = ((df - x) / (d - x)) * eps_s

# ---- Tensões ----

```

```

sigma_s = min(Esb * eps_s, fy)
sigma_sc = max(min(Esb * eps_sc, fyc), -fy)
sigma_f = min(Efb * eps_f, ff)
sigma_c = 0.85 * (fck / 1.4)

# ---- Novo x pelo equilíbrio ----
x_calc = (sigma_s * As + sigma_f * Af - sigma_sc * Asc) /
(0.8 * bw * sigma_c)

# ---- Critério de convergência ----
if abs(x_calc - x_old) <= tol:
    x = x_calc
    break
x = 0.5 * (x_old + x_calc)
else:
    print("Não convergiu")

# =====
# VERIFICAÇÃO FINAL DE DOMÍNIO 4
# =====
if x > xlim:
    print("\nX Seção em Domínio 4.")
    print(f"Linha neutra final ({x:.2f} cm) ultrapassou o limite
({xlim:.2f} cm).")
    print("O reforço têxtil não é admissível para esta
configuração.")
    return None, None, None, None, camadas, nome

# =====
# DETERMINAÇÃO DO MOMENTO ÚLTIMO
# =====

Mu = ((sigma_s * 0.1) * As * d + (sigma_f * 0.1) * Af * df - 0.32
* bw * (sigma_c * 0.1) * x ** 2 - (
    sigma_sc * 0.1) * Asc * dc)
# Conversão: MPa → kN/cm² (1 MPa = 0.1 kN/cm²)
if Mu >= Ms:
    return dominio, x, Ms, Mu, camadas, nome
else:
    camadas += 1

# =====
# ===== MENU =====
# =====
def encerramento():
    while True:
        print("\n" + "=" * 40)
        print("[1] Voltar ao menu principal")
        print("[0] Sair do programa")
        print("=" * 40)

        op = input("Escolha: ").strip().lower()

        if op == "1":
            return

```

```

elif op == "0":
    print("\nEncerrando o programa...")
    print("Obrigada!")
    exit()

else:
    print("Opção inválida!")

def menu():

    cabecalho()

    dados = entrada_dados()

    while True:

        print("\n" + "=" * 50)
        print("MENU PRINCIPAL")
        print("=" * 50)
        print("[1] Calcular pelo Método de TRINTIN")
        print("[2] Calcular pelo Método de BEEBER")
        print("[3] Calcular pelos DOIS e comparar")
        print("[0] Sair")
        print("=" * 50)

        op = input("Escolha uma opção: ")

        # ===== TRINTIN =====
        if op == "1":

            x, Ix, Mr, camadas, nome = metodo_trintin(dados)

            if x is not None:
                print("\n===== RESULTADO - TRINTIN =====")
                print(f"Posição da linha neutra (x) = {x:.3f} cm")
                print(f"Momento de Inercia (Ix) = {Ix:.3f} cm^4")
                print(f"Momento Resistente (Mr) = {Mr:.3f} kN.cm")
                print(f" O reforço necessário é de {camadas} camadas do
concreto têxtil {nome}.")
                encerramento()

            # ===== BEEBER =====
            elif op == "2":

                dominio, x, Ms, Mu, camadas, nome = metodo_beeber(dados)

                if x is not None:
                    print("\n===== RESULTADO - BEEBER =====")
                    print(f"A viga se encontra no domínio = {dominio}")
                    print(f"Posição da linha neutra (x) = {x:.3f} cm")
                    print(f"Momento Solicitante (Ms) = {Ms:.3f} kN.cm")
                    print(f"Momento Resistente (Mr) = {Mu:.3f} kN.cm")
                    print(f" O reforço necessário é de {camadas} camadas do
concreto têxtil {nome}.")
                    encerramento()

            # ===== COMPARAÇÃO =====
            elif op == "3":

```

```

print("\n--- MÉTODO TRINTIN ---")
x1, Ix, Mr, cam1, nome1 = metodo_trintin(dados)

print("\n--- MÉTODO BEEBER ---")
dominio, x2, Ms, Mu, cam2, nome2 = metodo_beeber(dados)

print("\n" + "=" * 100)
print(f"{'TABELA COMPARATIVA':^100}")
print("=" * 100)
print(f"{'Método':^15}{ 'Têxtil':^25}{ 'x (cm)':^10}{ 'Momento'
(kN.cm)':^20}{ 'Camadas':^10}")
print("-" * 100)

print(f"{'Trintin':^15}{nome1:^25}{x1:^10.2f}{Mr:^20.2f}{cam1:^10}")

print(f"{'Beeber':^15}{nome2:^25}{x2:^10.2f}{Mu:^20.2f}{cam2:^10}")
print("=" * 100)
encerramento()

elif op == "0":
    print("\nEncerrando programa...\n Obrigada!")
    break

else:
    print("Opção inválida!")

if __name__ == "__main__":
    menu()

```