



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

EUGÊNIO DOS SANTOS E SILVA

APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

RUSSAS

2024

EUGÊNIO DOS SANTOS E SILVA

APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jerfson Lima.

RUSSAS

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S579a Silva, Eugênio dos Santos e.
Aplicativo para dimensionamento de vigas de concreto armado / Eugênio dos Santos e Silva. – 2024.
75 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Ciência da Computação, Russas, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Jerfson Moura Lima.
1. Análise estrutural automatizada. 2. Aplicativo web. 3. Ferramenta de cálculo estrutural. 4.
Simulação de vigas biapoiadas . I. Título.

CDD 005

EUGÊNIO DOS SANTOS E SILVA

APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 11/09/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jerfson Moura Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Laís Cristina Barbosa Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Civil Francisco Lucas de Oliveira Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Por primazia, gostaria de agradecer a Deus por tudo que foi realizado até hoje em minha vida “Até aqui nos ajudou o Senhor.” (1 Samuel 7:12). Em seguida, estendo meus agradecimentos àqueles que, de alguma forma, participaram em algum momento da minha vida acadêmica.

À minha mãe, Maria Derlania dos Santos, que muito me apoiou nos meus estudos, estimulando-me desde as séries iniciais, e às minhas tias Melânia, Márcia, Raquel, Iramaia, Iracema, Ediana, Mônica, Bernadete, Natália e Ana Glória, cada uma de forma particular e importante, não apenas me estimularam na trajetória de estudos, como também se dispuseram, das formas mais diversas, a patrocinar minha caminhada. Minhas tias-avós Maria Luiza de Oliveira, Maria de Lourdes de Oliveira Freires e Maria José de Oliveira Dantas, que foram singulares no apoio em momentos cruciais da minha jornada.

À minha avó, Maria Damiana de Oliveira, cujo apoio sempre foi constante, não somente em palavras, mas também em gestos concretos. Ao meu grande amigo e padrinho de coração, Eugênio Plutarco Vasconcelos, que foi ímpar em sua participação em minha vida acadêmica e cuja admiração e respeito sempre terei em meu coração e em meus lábios.

À minha namorada, Iolanda de Carvalho Lima, que sempre me incentivou e me ajudou nos momentos difíceis da minha vida acadêmica.

Gostaria, ainda, de saudar e agradecer de forma honrosa àqueles que, pelos mais diversos motivos, não estão mais comigo, mas que sempre permanecerão em meu coração e serão para sempre lembrados: à minha avó muito amada, Maria Luiza da Silva; ao meu avô, José Lopes da Silva; e à minha tia-avó, a quem tenho todo respeito e admiração, Maria Miriam de Oliveira (*in memoriam*).

Aos meus amigos da faculdade, Caio Rogério, Breno Moreira, Joana Nara, Jaiza Lima, Vinicius Nascimento, Henrique Azevedo, Camila Barbosa, Daisy Siqueira e a muitos outros, cujos nomes não citarei, mas que sempre fizeram parte dessa fase da minha vida. Aos meus amigos que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, Thomas, Edgar Bruno Benicio, Rafael Rodrigues, Matheus Serafim e Maycon Castro.

Aos meus professores, Mylene, Jerfson Lima, Esequiel Mesquita, Daniela Machado e aos muitos outros que fizeram parte dessa caminhada.

E, por fim, mas não menos importante, ao meu pai, Eugênio Lopes da Silva, cujo nome herdei, expresso meu mais profundo e sincero agradecimento. Aquele que sempre esteve ao

meu lado, que sempre investiu tudo o que tinha, financeiramente, afetivamente e de forma humana, simples e profunda, em mim. Aquele que nunca duvidou das minhas capacidades e objetivos.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um aplicativo web, denominado AppCalc, destinado ao dimensionamento de vigas de concreto armado, com o objetivo de oferecer uma ferramenta acessível e precisa para engenheiros e estudantes. Utilizando HTML, JavaScript e Python, o aplicativo permite a realização de cálculos estruturais e a geração de imagens detalhadas das vigas, seguindo as diretrizes da NBR 6118:2023. A validação do AppCalc foi realizada por meio da comparação de seus resultados com aqueles obtidos manualmente e pelo software Eberick. Os resultados demonstraram alta consistência entre os métodos, comprovando a confiabilidade do aplicativo. A pequena variação encontrada nos cálculos foi atribuída a diferenças de arredondamento, sem impacto significativo na precisão. Conclui-se que o AppCalc é uma solução versátil, capaz de integrar diferentes linguagens de programação e oferecer resultados comparáveis a métodos tradicionais e ferramentas consolidadas no mercado. Assim, o AppCalc contribui significativamente para a prática da engenharia civil, facilitando o dimensionamento estrutural de forma eficiente e segura.

Palavras-chave: análise estrutural automatizada; ferramenta de cálculo estrutural; aplicativo web; simulação de vigas biapoiadas e AppCalc.

ABSTRACT

This work presents the development of a web application, named AppCalc, designed for the sizing of reinforced concrete beams, aiming to provide an accessible and accurate tool for engineers and students. Utilizing HTML, JavaScript, and Python, the application enables structural calculations and generates detailed images of the beams, adhering to the guidelines of NBR 6118:2023. The validation of AppCalc was conducted by comparing its results with those obtained manually and with the Eberick software. The results showed high consistency among the methods, confirming the application's reliability. The small variation observed in calculations was attributed to rounding differences, with no significant impact on accuracy. It is concluded that AppCalc is an innovative solution capable of integrating different programming languages and providing results comparable to traditional methods and established market tools. Thus, AppCalc significantly contributes to civil engineering practice by facilitating structural sizing efficiently and safely.

Keywords: automated structural analysis; structural calculation tool; web application; simulation of simply supported beams e AppCalc.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	12
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	12
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Vigas de Concreto Armado	14
2.1.1	<i>Esforços em vigas de concreto armado</i>	16
2.2	Dimensionamento conforme a ABNT NBR 6118: 2023	17
2.2.1	<i>Flexão</i>	18
2.2.2	<i>Equacionamento armadura simples à flexão - seção retangular</i>	20
2.2.3	<i>Esforço Cortante</i>	22
2.2.4	<i>Equacionamento para armadura transversal - Estribos</i>	24
2.2.5	<i>Verificação do estado limite de serviço – ELS</i>	26
2.2.6	<i>Equacionamento para verificação ELS - Aberturas de fissuras</i>	27
2.2.7	<i>Equacionamento para verificação ELS - Flecha máxima</i>	32
2.3	Softwares de dimensionamento	34
3	METODOLOGIA	39
3.1	Revisão Bibliográfica	39
3.2	Concepção do aplicativo	39
3.3	Desenvolvimento do Aplicativo AppCalc	39
3.3.1	<i>AppCalc</i>	42
3.4	Estudo paramétrico	45
4	ESTUDO DE CASO	45

4.1	Procedimento de Cálculo Manual	46
4.2	Resultado - AppCalc	47
4.3	<i>AltoQi Eberick</i>	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1	Validação do App	56
5.2	Aplicação do AppCalc	57
6	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A - CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO APPCALC	64
	APÊNDICE B - RESULTADO CÁLCULO MANUAL	75

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é amplamente reconhecido por sua versatilidade de aplicação, capacidade de adaptação a diversas formas, desde que atendidas as normas técnicas vigentes, e sua longa durabilidade. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2017), o concreto armado constitui um dos principais pilares da construção civil, tanto no Brasil quanto em âmbito internacional, destacando-se como o principal material estrutural. As estruturas de concreto armado geralmente são compostas por três elementos principais: lajes, vigas e pilares. A otimização dos custos de produção desses elementos estruturais pode resultar em economias significativas, como destacam os autores ao ressaltar a importância de um dimensionamento eficiente.

O processo de dimensionamento de estruturas de concreto armado é complexo, exigindo a verificação de diversos critérios para garantir que a estrutura atenda aos Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS), conforme estabelecido pelas normas técnicas (Carvalho e Figueiredo Filho, 2017). A realização desses cálculos e verificações de forma manual é uma tarefa exaustiva, tornando essencial a simplificação desse procedimento.

Com o avanço da informática, o uso de ferramentas computacionais para a análise e dimensionamento de estruturas tornou-se uma prática comum. No Brasil, softwares como o AltoQi Eberick e o TQS são amplamente utilizados, oferecendo precisão e eficiência no processo de dimensionamento. No entanto, conforme apontado por Carvalho e Figueiredo Filho (2017), esses softwares são robustos e abordam uma ampla gama de variáveis e elementos estruturais, o que, apesar de torná-los ferramentas poderosas, pode representar uma barreira em termos de custo e complexidade, especialmente para estudantes e iniciantes na área.

Diante desse cenário, surge a necessidade de ferramentas mais acessíveis e direcionadas ao aprendizado. O aplicativo desenvolvido neste trabalho tem como objetivo principal oferecer uma abordagem didática, facilitando a compreensão dos conceitos fundamentais de dimensionamento estrutural. Ao contrário de softwares robustos como o TQS e Eberick, que abrangem um amplo espectro de análises estruturais, este aplicativo atua como uma ferramenta educacional. Ele proporciona um ambiente simplificado onde estudantes e profissionais em início de carreira podem aprofundar seus conhecimentos de maneira direta, servindo como uma ponte entre o aprendizado teórico e o uso de softwares profissionais mais complexos.

1.1 Justificativa

O estudo de estruturas de concreto armado é notoriamente complexo, devido às diversas características dos materiais e às múltiplas forças que atuam sobre as estruturas. A precisão no dimensionamento dessas estruturas é crucial para garantir segurança e economia, mas o processo de cálculo manual pode ser exaustivo e suscetível a erros. Nesse contexto, é fundamental que o projetista tenha à disposição ferramentas que auxiliem no dimensionamento, mesmo quando utiliza programas, pois essas ferramentas podem otimizar o trabalho e reduzir o tempo de análise.

Este estudo propõe o desenvolvimento de um aplicativo web específico para o cálculo de vigas, com o objetivo de simplificar e agilizar o processo de dimensionamento, tornando-o mais acessível tanto para profissionais quanto para estudantes. Embora existam softwares como o Eberick, com interfaces robustas e complexas, a criação de um aplicativo com uma interface mais intuitiva pode ser especialmente útil no contexto acadêmico.

Isso não apenas facilita a obtenção de resultados rápidos e precisos, mas também oferece uma excelente ferramenta de aprendizagem, permitindo aos alunos explorar e compreender os princípios de dimensionamento de maneira prática e didática. Além disso, professores podem utilizar o aplicativo para enriquecer suas metodologias de ensino, promovendo um ambiente de aprendizado mais interativo e eficaz.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um aplicativo de cálculo de vigas de concreto armado para aplicações acadêmicas e profissionais, visando simplificar o dimensionamento de estruturas de acordo com a ABNT NBR 6118:2023.

1.2.2 Objetivos específicos

- Projetar a interface do aplicativo utilizando HTML e JavaScript, proporcionando uma experiência de usuário intuitiva e eficiente, com funcionalidades que atendam às necessidades de engenheiros e estudantes;

- Avaliar a eficácia do aplicativo em reduzir o tempo de dimensionamento de vigas de concreto armado em projetos estruturais.
- Validar a precisão dos cálculos realizados pelo aplicativo por meio de comparações com cálculos manuais e resultados obtidos de softwares comerciais, como o AltoQi Eberick;
- Implementar cálculos detalhados para determinar a área de aço, detalhamento da viga, fissuração, flechas, e gerar imagens ilustrativas das vigas, utilizando Python para o processamento dos dados;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Vigas de Concreto Armado

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), as estruturas são compostas por elementos estruturais que possuem, em geral, uma ou duas dimensões predominantes. As vigas são elementos estruturais lineares que fazem parte de um sistema estrutural juntamente com lajes e pilares, tendo como função transferir os esforços verticais das lajes e seu peso próprio para os pilares de uma edificação. E dois desses elementos, as lajes e as vigas, são submetidos à Flexão Normal Simples, embora possam também, eventualmente, estarem submetidos à flexão composta. Por isso, o dimensionamento de seções retangulares e seções T sob flexão normal simples é a atividade diária mais comum aos engenheiros projetistas de estruturas de concreto armado (SANTOS, 1983).

Para garantir sua capacidade de suporte e resistência, as vigas de concreto armado são reforçadas com barras de aço, conhecidas como armaduras. Esses reforços são colocados de forma estratégica ao longo da extensão da viga, em conformidade com as exigências de resistência e a distribuição das cargas previstas, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Representação de uma viga de concreto armado.



Fonte: Kaufmann (2016).

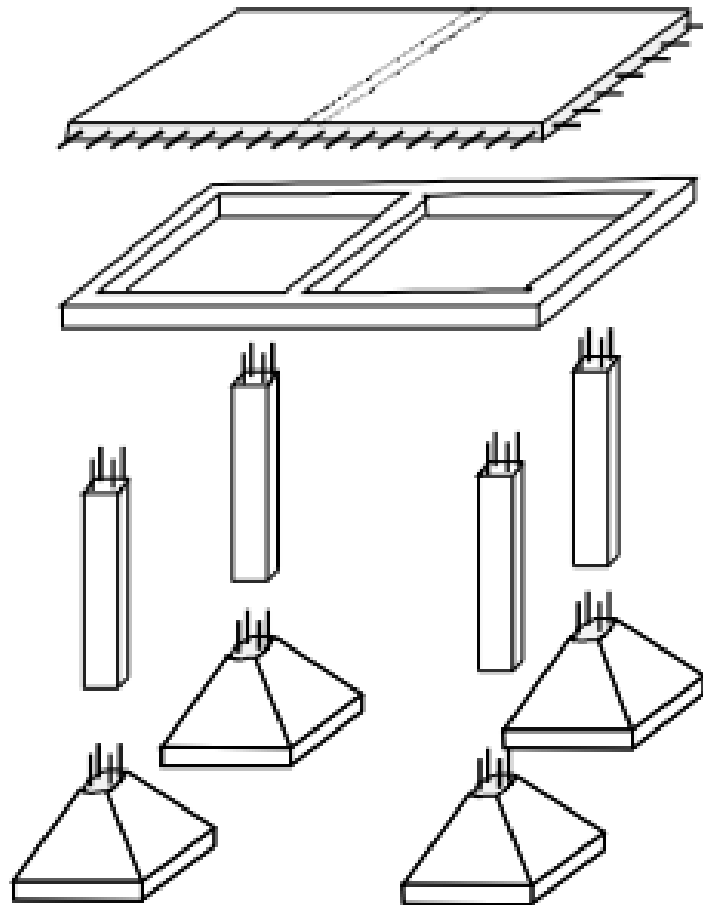
A finalidade das armaduras nas vigas de concreto armado é proporcionar resistência à tração, uma vez que o concreto é um material resistente à compressão, mas relativamente frágil à tração. As armaduras atuam absorvendo as tensões de tração, que podem surgir devido a cargas aplicadas, variações térmicas ou movimentações da estrutura.

Além de aumentar a resistência à tração, as armaduras também ajudam a controlar fissuras no concreto, melhorando sua durabilidade e desempenho estrutural ao longo do tempo. Portanto, as armaduras desempenham um papel crucial na garantia da segurança e estabilidade das vigas de concreto armado, contribuindo para a solidez e confiabilidade das estruturas construídas.

A concepção estrutural de uma viga de concreto armado envolve a definição do esquema estrutural, a determinação das cargas atuantes, e o cálculo dos esforços internos, como momentos fletores e esforços cortantes. Esses esforços orientam o dimensionamento da seção transversal da viga e a disposição das armaduras, garantindo que o concreto suporte as tensões de compressão e o aço, as de tração. Essa integração é essencial para a segurança e a eficiência da estrutura.

A Figura 2 apresenta, esquematicamente, o pórtico tridimensional correspondente à estrutura de um edifício de concreto armado. Segundo Bandeira (2015), a concepção estrutural consiste no estabelecimento de um arranjo adequado dos elementos estruturais básicos de modo a atender, simultaneamente, as restrições impostas pelos projetos arquitetônico e de instalações prediais

Figura 2 - Elementos estruturais de um edifício



Fonte: Bandeira (2015)

2.1.1 Esforços em vigas de concreto armado

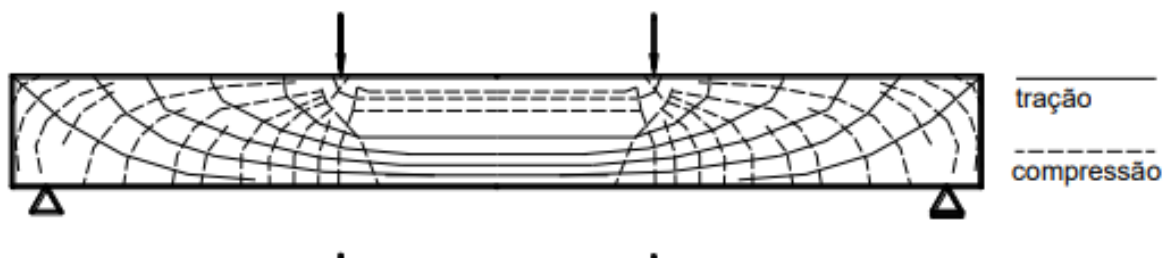
Os esforços em vigas de concreto armado são um tema central no estudo de estruturas, abordando como as forças externas atuam sobre esses elementos e como eles respondem a essas solicitações. Ao se projetar uma viga de concreto armado, é crucial considerar os diferentes tipos de esforços que podem ocorrer, como a flexão, o cisalhamento e a torção.

A flexão é o esforço predominante em vigas, onde a estrutura é submetida a momentos fletores que causam tensões de compressão e tração ao longo da seção transversal. Segundo Siqueira (2020), ao dimensionar uma viga para resistir à flexão, é essencial garantir que a armadura seja adequadamente posicionada para resistir às tensões de tração, enquanto o concreto suporta as tensões de compressão. Este equilíbrio entre os materiais é a base do funcionamento das vigas de concreto armado. Se há uma variação de momento fletor ao longo do eixo de uma estrutura, haverá a existência de forças cortantes, que por sua vez originam

tensões de cisalhamento variáveis ao longo da altura da seção, dependendo da seção transversal da peça.

Considerando uma viga biapoiada de concreto armado, submetida a duas forças concentradas P crescentes e de igual magnitude, a armadura da viga é composta por uma armadura longitudinal, responsável por suportar as tensões de tração decorrentes da flexão, e uma armadura transversal, projetada para resistir aos esforços cortantes. A armadura transversal é constituída por estribos verticais no lado esquerdo da viga, e no lado direito, por uma combinação de estribos e barras dobradas. A Figura 3 ilustra as trajetórias das tensões principais de tração e compressão na viga, ainda no Estádio I.

Figura 3 - Representação de uma viga de concreto armado.



Fonte: Bastos (2023).

No trecho de flexão pura, as trajetórias das tensões de compressão e tração permanecem paralelas ao eixo longitudinal da viga. Nos outros trechos, essas trajetórias se inclinam devido à influência dos esforços cortantes. Enquanto a resistência à tração do concreto for superior às tensões principais de tração, não surgem fissuras na viga. As primeiras fissuras de flexão aparecem apenas na região onde os momentos fletores são máximos, no momento em que as tensões de tração superam a resistência do concreto à tração na flexão. Nesse estágio de carregamento, a viga apresenta regiões fissuradas, no Estádio II, e regiões ainda não fissuradas, no Estádio I.

Vale ressaltar que a orientação ou inclinação das fissuras é aproximadamente perpendicular à direção das tensões principais de tração, o que faz com que as fissuras na região de flexão pura sejam verticais (BASTOS, 2023).

2.2 Dimensionamento conforme a ABNT NBR 6118: 2023

Para uniformizar os projetos estruturais, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece as diretrizes para o dimensionamento e detalhamento de estruturas

de concreto armado, protendido ou pré-moldado determinando especificações a serem seguidas. A ABNT NBR 6118:2023 é uma norma que define parâmetros gerais para projetos estruturais em concreto simples, armado ou protendido, e que estabelece a análise estrutural objetiva, visando determinar as consequências das ações na estrutura por meio das verificações no estado limite último (ELU) e no estado limite de serviço (ELS).

No ELU, as solicitações são majoradas e a resistência dos materiais é minorada, garantindo a segurança da estrutura mantendo as solicitações majoradas inferiores à resistência última da estrutura. As solicitações são chamadas de solicitações características antes de serem majoradas e, após a aplicação dos fatores de majoração, passam a ser denominadas solicitações de projeto. Os fatores de ponderação utilizados para o concreto e o aço conforme as combinações estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fatores de ponderação para o ELU

Combinações	Concreto (γ_c)	Aço (γ_s)
Normais	1,4	1,15
Especiais	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,00

Fonte: ABNT NBR 6118 (2023).

2.2.1 Flexão

No dimensionamento das seções de vigas de concreto, as armaduras devem ser dimensionadas para os esforços de momento fletor e esforço cortante. As solicitações usadas no cálculo são majoradas pelo coeficiente de segurança $\gamma_f = 1,4$ e a resistência do concreto e do aço são minoradas pelos fatores $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$, respectivamente.

As hipóteses básicas de cálculo para elementos sujeitos a solicitações normais no Estado Limite Último, de acordo com a ABNT NBR 6118:2023 são: seções planas permanecem planas após as deformações de flexão, a deformação da barra é a mesma do concreto em seu entorno, as tensões de tração do concreto no ELU são desprezadas e o alongamento máximo do aço da armadura de tração é de 10%. Na compressão simples, o encurtamento do concreto é de 2%, enquanto que na flexão simples é de 3,5%. Em uma viga, podem ser verificados três estádios de deformações de concreto na flexão normal simples: estágio I (estado elástico), estágio II (estado de fissuração) e estágio III (estado limite último).

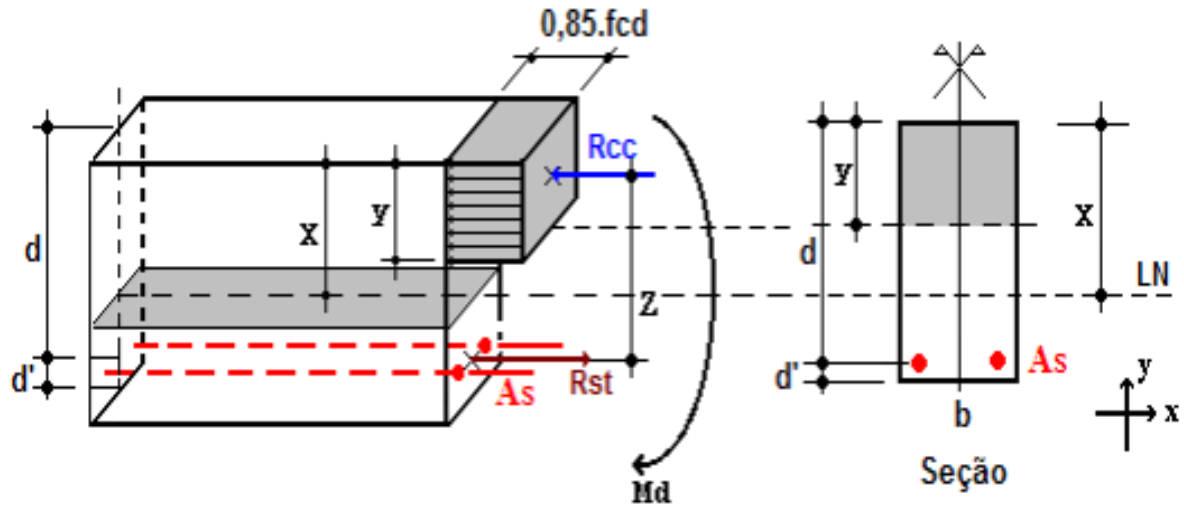
No Estádio II, o momento fletor é maior em relação ao Estádio I, resultando em tensões de tração abaixo da linha neutra que excedem as tensões características resistidas pelo concreto. Nesse estágio, iniciam-se as fissuras na flexão, e considera-se que apenas o aço é responsável por resistir aos esforços de tração. Este comportamento está diretamente relacionado ao Estado Limite de Serviço (ELS), onde é fundamental que as fissuras e deformações sejam controladas para garantir o desempenho adequado da estrutura em uso, sem comprometer a funcionalidade ou a durabilidade.

Por outro lado, no Estádio III, o momento fletor ao qual a viga está submetida se aproxima do momento fletor de colapso, correspondendo ao Estado Limite Último (ELU), onde a peça se encontra em condições extremas e próximas da ruptura. As estruturas de concreto armado são dimensionadas para este estado, pois as ações são majoradas e as resistências são minoradas, garantindo assim a segurança do dimensionamento e prevenindo o colapso estrutural, sob as maiores cargas possíveis.

A ABNT NBR 6118:2023 define a nomenclatura das grandezas envolvidas no cálculo de dimensionamento das peças de concreto armado. Os parâmetros e suas respectivas nomenclaturas utilizadas neste trabalho são apresentados a seguir na Figura 4:

- a) **Altura útil (d):** Distância entre o centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada e a fibra mais comprimida do concreto.
- b) **Momento fletor solicitante de cálculo (M_{sd}):** Obtido multiplicando o momento característico pelo fator de majoração de cargas.
- c) **Momento fletor resistente de cálculo (M_{ra}):** Maior momento fletor que a seção pode resistir.
- d) **bw :** Largura da seção transversal da viga retangular ou largura da alma em vigas com seção T.
- e) **h :** Altura total da seção transversal da viga.
- f) **Braço de alavanca (z):** Distância entre o ponto de aplicação da resultante das tensões normais de compressão no concreto e a resultante das tensões normais de tração no aço.
- g) **Altura da linha neutra (x):** Distância entre a fibra mais comprimida do concreto e o ponto em que a tensão e a deformação são nulas.

Figura 4 - Representação de uma viga de concreto armado.



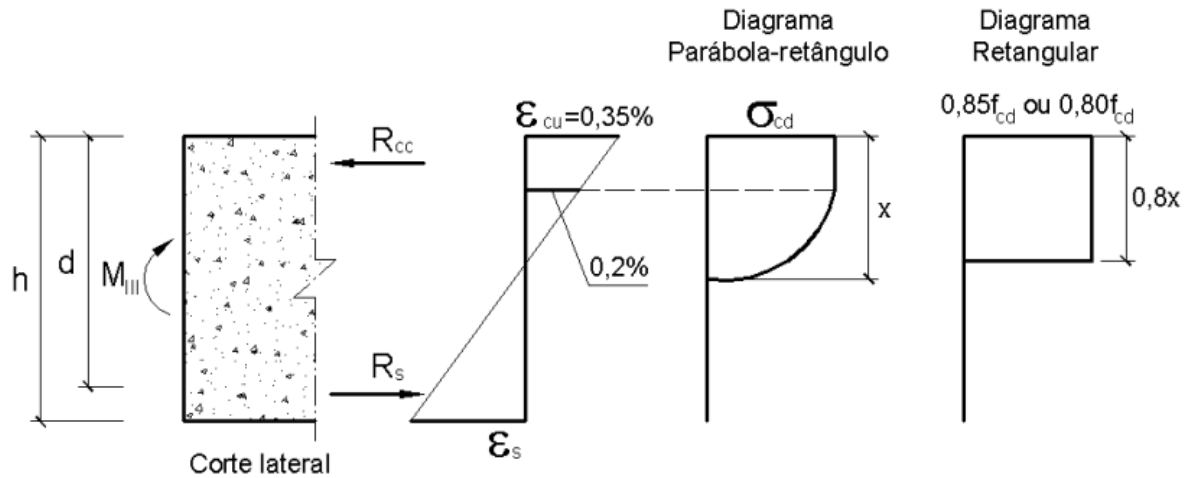
Fonte: Mesquita (2015).

2.2.2 Equacionamento armadura simples à flexão - seção retangular

O equacionamento para o dimensionamento da armadura simples em seção retangular é realizado considerando o equilíbrio de forças atuantes na seção da viga. Os dados necessários para o cálculo são a resistência do concreto (F_{ck}), o tipo de aço (F_{yd}), a largura da seção (b_w) e a altura útil (d). A fim de garantir um comportamento dúctil adequado em vigas, a ABNT NBR 6118:2023 limita a posição da linha neutra no Estado Limite Último (ELU) (para concretos com $F_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$) a $x = 0,45d$.

Este método propõe a determinação do Fator de Segurança (F_s) por meio de uma equação linear. Além disso, destaca-se que a superfície de ruptura considerada nesse método é de natureza circular. Embora a técnica simplifique as forças entre as fatias, presumindo que tais forças sejam paralelas à base da fatia e, assim, as negligencie, observa-se, conforme argumentado por Fredlund (1977), que tal afirmação carece de precisão. Isso se deve ao fato de que, ao transitar de uma fatia para outra, ocorre uma mudança significativa na inclinação das forças.

Figura 5 - Parâmetros da seção retangular para equacionamento.



Fonte: Pinheiro (2007)

Considerando a Figura 5, onde estão apresentados os parâmetros da seção retangular para o equacionamento, temos as seguintes equações:

$$R_c = (0,85 \times f_{cd}) \times (0,8 \times x) \times (bw) \quad (2.1)$$

$$R_s = A_s \times f_s \quad (2.2)$$

Uma vez que a resistência à tração do concreto é baixa, ela é desprezada, e a resistência à tração é dada pela seção de aço (R_s). A parcela R_c corresponde à resultante de compressão no concreto ao longo da largura. Equacionando o equilíbrio da seção em relação às forças horizontais (Equação 3), temos:

Equação 3:

$$R_c - R_s = 0 \rightarrow R_c = R_s \quad (2.3)$$

O braço de alavanca (z) é definido como a distância entre as forças R_c e R_s , e de acordo com a Figura 1, é dado pela equação:

$$z = d - 0,4x \quad (2.4)$$

Aplicando o equilíbrio de momentos (Equação 6), chegamos à equação que permite determinar a altura da linha neutra:

$$Md = R_c \times z \quad (2.5)$$

Desenvolvendo o equacionamento a partir das equações 2.1, 2.4 e 2.5, encontramos a seguinte equação para a altura da linha neutra:

$$(0,272 \times bw \times f_{cd}) \times x^2 - (0,68 \times bw \times f_{cd} \times d) \times x + Md = 0 \quad (2.6)$$

A altura da linha neutra é obtida como uma das raízes aceitáveis da equação 7. Para o cálculo da área de aço necessária, utilizamos as equações 2, 3 e 5, resultando na seguinte equação:

$$Md = Rs \times z \rightarrow Md = (As \times fs) \times (d - 0,4x) \quad (2.7)$$

A partir daí, assumindo que a peça está trabalhando nos domínios 2 ou 3 para um melhor aproveitamento da armadura, podemos adotar $\epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$, resultando em uma tensão de escoamento da armadura ($f_s = f_{yd}$). Portanto, a área de aço necessária (A_s) é dada pela seguinte equação:

$$As = \left(\frac{(Md)}{(d-0,4x) \times f_{yd}} \right) \quad (2.8)$$

Através do valor da área de aço calculada, é necessário estimar a quantidade de barras φ necessárias para atingir essa área de aço desejada as quais podem ser obtidas pela razão entre a área de aço calculada e a área da bitola utilizada.

$$n = \frac{(As)}{(As\varphi)} \quad (2.9)$$

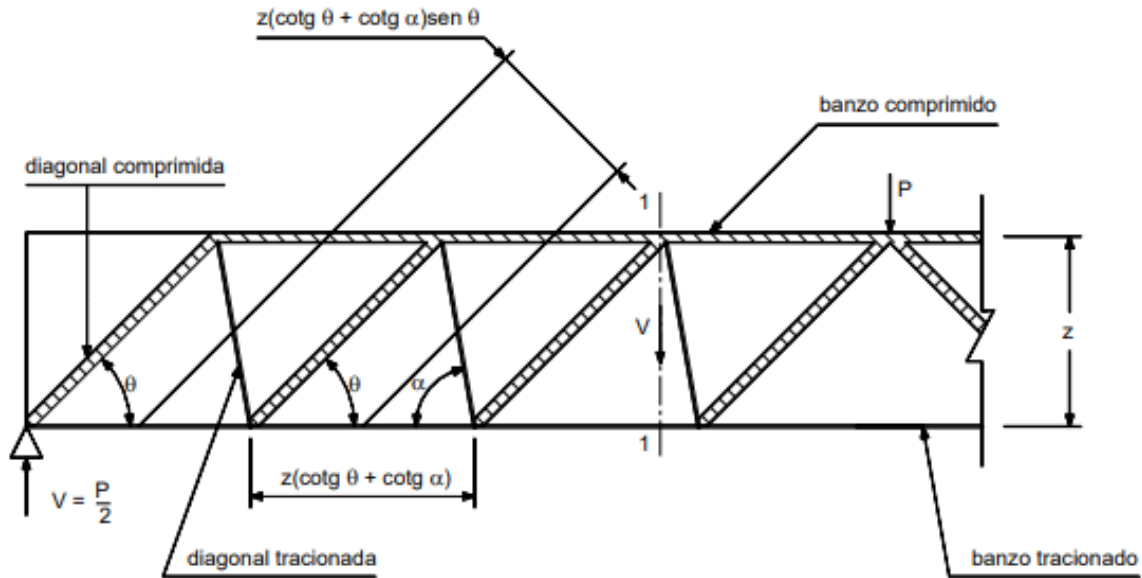
2.2.3 Esforço Cortante

O cálculo de dimensionamento para o esforço cortante é realizado com base em uma analogia de treliça idealizada por Mörsch. No modelo de treliça de Mörsch, após a fissuração, o esforço cortante é equilibrado pela associação de bielas comprimidas de concreto e diagonais tracionadas, que seguem as trajetórias das tensões principais (SOUSA, 2018).

As bielas inclinadas de compressão devem ter suas tensões limitadas para evitar a ruptura por esmagamento do concreto. As diagonais tracionadas são formadas por estribos de armadura transversal, devidamente dimensionados para suportar o esforço de tração calculado. A treliça idealizada, conforme ilustrado na Figura 6, é composta pelos seguintes elementos:

- a) **Banzo superior:** cordão de concreto comprimido
- b) **Banzo inferior:** armadura longitudinal de tração
- c) **Diagonais comprimidas:** bielas de concreto entre as fissuras
- d) **Diagonais tracionadas:** armadura transversal (estribos).

Figura 6 – Modelo de treliça de Morsch



Fonte: Bastos (2023).

As hipóteses básicas para a analogia de treliça clássica são as seguintes:

- Fissuras e bielas de compressão com inclinação de 45° em relação ao eixo da viga, acompanhando as tensões principais na altura da linha neutra;
- Banzos paralelos;
- Treliça isostática, sem esmagamento nos nós (ligações entre banzos e diagonais);
- Armadura de cisalhamento com inclinação entre 45° e 90° .

No entanto, a teoria clássica da treliça geralmente resulta em uma armadura superior ao necessário. Portanto, foi desenvolvido o modelo de treliça generalizada de Morsch, no qual os valores dos ângulos definidos no modelo clássico variam de acordo com múltiplos parâmetros.

A norma ABNT NBR 6118:2023 adota dois modelos de cálculo que diferem na inclinação das bielas comprimidas. De acordo com Bezerra (2017), esses modelos calculam não apenas a tensão nas bielas, mas também a armadura transversal e os mecanismos resistentes complementares representados por uma componente adicional, representando a resistência ao esforço cortante do concreto (V_c). O modelo I, adotado, assume bielas com inclinação $\theta = 45^\circ$ e um V_c constante, independente da força cortante de projeto (V_{sd}).

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2014), para esse modelo de treliça, as hipóteses básicas são as seguintes:

- a) A treliça é hiperestática, considerando nós que não são articulações perfeitas;
- b) Nas regiões mais solicitadas pelo esforço cortante, a inclinação da fissura é menor que 45°;
- c) Parte do esforço cortante é absorvida na zona de concreto comprimido;
- d) Os banzos não são paralelos;
- e) As bielas de concreto estão parcialmente engastadas na ligação do banzo com o comprimido, aliviando as diagonais tracionadas por meio da flexocompressão;
- f) As bielas são mais rígidas que as diagonais comprimidas e absorvem uma parcela maior do esforço cortante;
- g) A quantidade de armadura longitudinal que influencia no esforço da armadura transversal.

Onde V_{sd} é a força cortante de cálculo, V_{rd2} é a força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto, V_c é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça e V_{sw} é a parcela de força obtida pela armadura transversal ABNT NBR 6118:2023.

2.2.4 Equacionamento para armadura transversal - Estribos

O procedimento de cálculo o qual considera o modelo I, segue os seguintes passos:

- Verificação das tensões de compressão nas bielas:

$$V_{sd} \leq V_{rd2} = 0,27 \times \alpha_{v2} \times f_{cd} \times b_w \times d \quad (2.10)$$

Onde:

$$\alpha_{v2} = 1 - \left(\frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (2.11)$$

E o f_{ck} (em MPa)

- Cálculo da armadura transversal:

$$V_{sw} = V_{rd3} - V_c \quad (2.12)$$

Sendo V_{rd3} a força cortante resistente de cálculo mínima igual à força cortante de cálculo solicitante (V_{sd}):

$$V_{sw} = V_{sd} - V_c \quad (2.13)$$

No caso da flexão simples e flexo-tração com a linha neutra cortando a seção, o valor de V_c é dado por:

$$V_c = 0,09 \times (F_{ck})^{2/3} \times bw \times d \quad (2.14)$$

Onde $F_{ctd} = 0,15 \times (f_{ck}^{2/3})$ (em MPa)

Considerando estribos verticais ($\alpha = 90$), a força resistida pela armadura transversal é calculada por:

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) \times 0,9 \times d \times f_{ywd} \quad (2.15)$$

Onde:

A_{sw} : área de todos os ramos da armadura transversal

s : espaçamento da armadura transversal

f_{ywk} : tensão na armadura transversal passiva limitada ao valor de f_{yd} , limitado a 435 MPa pela ABNT NBR 6118 2023

- Determinação da área de armadura transversal por unidade de comprimento:

Isolando o termo da área, temos:

Equação 15:

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right) = (V_{sw})(0,9 \times d \times f_{ywd}) \quad (2.16)$$

Observação: O aço usualmente empregado para estribos é o CA-60. Entretanto, a ABNT NBR 6118 2023 restringe a tensão máxima de f_{ywd} para 43,5 kN/cm².

- Verificação da ductilidade à ruína por cisalhamento:

Determinação da área de armadura mínima transversal por unidade de comprimento:

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{\text{mín}} = p_{\text{mín}} \times bw \quad (2.17)$$

Onde:

$$p_{\text{mín}} = \left(0,2 \times \frac{f_{ctm}}{f_{ywk}}\right) \quad (2.18)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \times (f_{ctm}^{2/3}) \text{ (em MPa)}$$

$f_{ywk} = A$ depender do aço utilizado CA – 50 = 500 MPa ; CA – 60 = 600 MPa

- Determinação do número de barras de estribo por metro:

$$n = \left(\frac{\frac{A_{sw}}{s}}{A_s \phi t \times 2} \right) \quad (2.19)$$

Onde:

$A_s \phi t$ é a área da bitola escolhida para os estribos.

- Cálculo do espaçamento entre estribos:

$$s = \left(\frac{100 \text{ cm}}{n} \right) \quad (2.20)$$

- Verificação do espaçamento máximo entre os estribos:

$$s \leq s_{\text{máx}}$$

Onde:

$$s \leq s_{\text{máx}}$$

$$s_{\text{máx}} \leq 0,6 \times d \leq 300 \text{ mm se } V_{sd} \leq 0,67 \times V_{rd2}$$

$$s_{\text{máx}} \leq 0,3 \times d \leq 200 \text{ mm se } V_{sd} > 0,67 \times V = 0,6 \times d \text{ (para } V_{sd} \leq 0,67 \times V)$$

2.2.5 Verificação do estado limite de serviço – ELS

O estado limite de serviço (ELS) é uma das fases de análise do comportamento de uma estrutura e envolve a avaliação de deformações, fissuração e outras características que não comprometem a segurança da estrutura, mas que podem afetar seu desempenho e durabilidade.

De acordo com Camacho (2009), estão relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e uso funcional adequado, seja em relação aos usuários, máquinas ou equipamentos.

Durante a vida útil da estrutura, são geralmente considerados os estados limites de serviço, que incluem:

- Danos leves ou localizados que comprometem a estética ou durabilidade da construção;
- Deformações excessivas que afetam o uso normal ou a aparência da construção;
- Vibrações excessivas ou desconfortáveis.

De acordo com a ABNT NBR-6118, os estados limites de serviço são divididos em:

- a) Estado Limite de Formação de Fissuras (ELS-F): Início da formação de fissuras, quando a tensão de tração máxima na seção transversal é igual a $f_{ct,t}$.
- b) Estado Limite de Abertura de Fissuras (ELS-W): Fissuras com aberturas iguais aos máximos especificados no item 13.4.2 da ABNT NBR-6118.
- c) Estado Limite de Deformações Excessivas (ELS-DEF): Deformações que atingem os limites estabelecidos para o uso normal da estrutura (ver item 13.3 da ABNT NBR-6118).
- d) Estado Limite de Vibrações Excessivas (ELS-VE): Vibrações que atingem os limites estabelecidos para o uso da construção.
- e) Estado Limite de Compressão Excessiva (ELS-CE): Tensões de compressão que atingem o limite convencional estabelecido (item 3.2.5 da ABNT NBR-6118).
- f) Estado Limite de Descompressão (ELS-D): Relacionado ao concreto protendido (item 3.2.5 da ABNT NBR-6118).
- g) Estado Limite de Descompressão Parcial (ELS-DP): Relacionado ao concreto protendido (item 3.2.6 da ABNT NBR-6118).

Para a ABNT NBR-6118 (11.8.3), na verificação do estado limite de deformações excessivas, podem ser usadas combinações quase permanentes de serviço (CAMACHO 2009). Na verificação dos estados limites de formação de fissuras, abertura de fissuras e vibrações excessivas, podem ser utilizadas combinações frequentes de serviço. Para verificações de estados limites de deformações excessivas devido a vento ou temperatura, que podem comprometer as vedações, podem ser usadas combinações raras de serviço.

2.2.6 Equacionamento para verificação ELS - Aberturas de fissuras

Para averiguar se os valores de fissuração estão de acordo com a ABNT NBR 6118 2023, faz-se necessário que os valores atendam aos limites estabelecidos para cada classe de agressividade como apresentados na Tabela 2.

Conforme o item 11.8.1 da ABNT NBR 6118:2023, um carregamento é caracterizado como a combinação de ações que têm probabilidades significativas de ocorrerem simultaneamente sobre a estrutura durante um determinado período. Essa combinação, de acordo com Leggerini (2003), deve ser efetuada de forma a possibilitar a determinação dos efeitos negativos para a estrutura, bem como a verificação da segurança em relação aos Estados Limites Últimos e de Serviço. Na análise de fissuras, é necessário considerar tanto as

combinações frequentes quanto as raras nas combinações de serviço aplicadas.

Tabela 2 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Tipo de protensão	Classe de agressividade ambiental (CAA)	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	-	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	-	CAA I	ELS-W Wk ≤ 0,4mm	Combinação frequente
	-	CAA II e CAA III	ELS-W Wk ≤ 0,3mm	
	-	CAA IV	ELS-W Wk ≤ 0,2mm	
Concreto Protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração	CAA I	ELS-W Wk ≤ 0,2mm	Combinação frequente
	Pós-tração	CAA I e CAA II		
Concreto Protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração	CAA I e CAA II	Verificar as duas condições abaixo: ELS-F Combinação Frequente; ELS-Da Combinação frequente.	
	Pós-tração	CAA I a CAA IV		
Concreto Protendido nível 3(protensão completa)	Pré-tração	CAA I a CAA IV	Verificar as duas condições abaixo: ELS-F Combinação Frequente; ELS-Da Combinação frequente.	
	Pós-tração	CAA I a CAA IV		
<p>Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens;</p> <p>No caso de pré-tração em estruturas de concreto pré-fabricado, devem ser atendidos os requisitos da ABNT NBR 9062;</p> <p>NOTA 1 As definições de de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2;</p> <p>NOTA 2 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.</p>				
<p>A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com ap= 50 mm (ver Figura 3.1).</p>				

Fonte: ABNT NBR: 6118 (2023).

A fim de verificar se a viga está atendendo aos limites impostos pela ABNT NBR, existem duas equações as quais devem ser comparadas ao limite da tabela 2, retirando sempre o maior valor dentre as duas para verificar se a fissuração excede a prevista por norma.

$$wI = \frac{\varphi_i \times \theta_{si} \times \theta_{si} \times 3}{12,5 \times n_i \times E_{si} \times F_{ct,m}} \quad (2.21)$$

$$wII = \frac{\varphi_i \times \theta_{si} \times \left(\frac{4}{p_{ri}} + 45 \right)}{12,5 \times n_i \times E_{si}} \quad (2.22)$$

Em que:

φ_i = Diâmetro da armadura longitudinal em mm

θ_{si} = Tensão de tração no centro de gravidade da barra em MPa

n_i = Valor de referência para aderência barra nervurada 2,25 adimensional

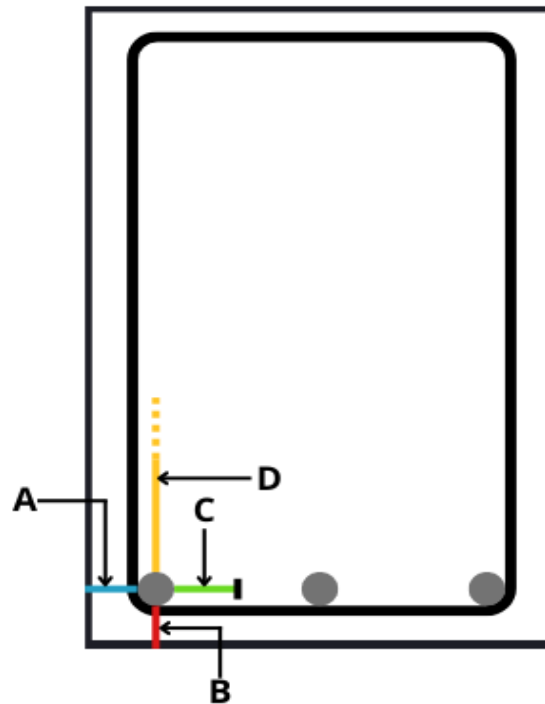
$$F_{ct,m} = 0,3 \times (F_{ck})^{\frac{1}{2}}$$

P_{ri} = é a taxa de armadura passiva ou ativa aderente (que não esteja dentro de bainha) em relação à área da região de envolvimento (A_{cri})

Com o intuito de determinar P_{ri} , é necessário determinar a região de envolvimento A_{cri} , dessa forma há algumas regras para determinar essa região

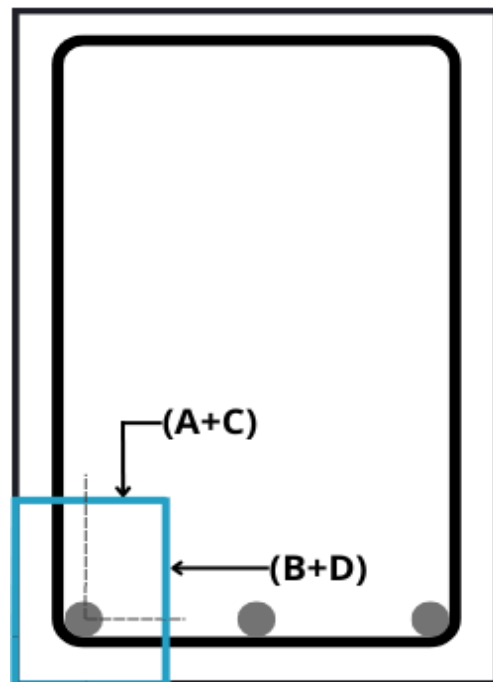
- a) A região de envolvimento se dará pelo “retângulo” de concreto que compreende a barra de aço, delimitado em azul na Figura 8;
- b) As dimensões do retângulo são todas as direções que uma barra de aço em uma viga de concreto armado pode conceber.
- c) Entre duas barras essa distância será do centro das barras dividido por 2, como exposto na Figura 7 representado pela letra C na cor verde;
- d) Em caso de barras na extremidade essa distância será da barra até a face externa da viga, como exposto na Figura 7 representado pelas letras A e B respectivamente em azul e vermelho;
- e) Em casos em que não há barras ou extremidade em alguma das direções, a distância será $7,5 \times \Phi$ como exposto na Figura 7 representado pela letra D em amarelo;
- f) Em todos os casos deve ser verificado se a distância foi $7,5 \times \Phi$, caso a distância seja maior que $7,5 \times \Phi$ para essa direção a distância será $7,5 \times \Phi$.
- g) A região de envolvimento se dará pelo “retângulo” de concreto que compreende a barra de aço (Figura 8):

Figura 7 - Perfil transversal da viga indicando as variáveis para cálculo do A_{cri} em cm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 8 - Perfil transversal da viga indicando a área de concreto compreendida pela barra de aço em cm^2 .



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com os valores de A_{cri} , faz-se a comparação para encontrar a situação mais crítica de A_{cri} , o qual leva ao maior valor de fissuração. Dessa forma,

$$Pri = \left(\frac{As}{A_{cri}} \right) \quad (2.23)$$

É necessário encontrar a linha neutra no estágio 2, pois neste estágio as fissuras ainda não aconteceram, permitindo que haja um aproveitamento total da inércia a peça

$$XII = \frac{(-a2 \pm \sqrt{a2^2 - 4 \times a1 \times a3})}{2 \times a1} \quad (2.24)$$

Em que:

Equação 23:

$$a1 = \left(\frac{bw}{2} \right) \quad (2.25)$$

$$a2 = ae \times As \quad (2.26)$$

$$a3 = -d \times ae \times As \quad (2.27)$$

$$ae = \left(\frac{Es}{Ecs} \right) \quad (2.28)$$

Após a determinação do XII é necessário o cálculo do $I_{x,IIo}$

Equação 24:

$$I_{x,IIo} = \left(bw \times \frac{X2^3}{3} \right) + ae \times As \times (XII - d)^2 \quad (2.29)$$

A tensão no centro de gravidade da barra :

$$\theta si = \left(\frac{Mat}{I_{x,IIo}} \right) \times ae \times ysi \quad (2.30)$$

Em que:

$$Mat = \frac{\left((g1 + g2 + 0,4 \times q) \times Mmáx \right)}{(g1 + g2 + q)} \quad (2.31)$$

ysi = Distância da armadura até a linha neutra no estágio II

Uma vez que se têm todos os valores da equação X, pode-se obter o valor da fissuração.

2.2.7 Equacionamento para verificação ELS - Flecha máxima

Com o intuito de determinar a flecha na viga, é necessário, utilizar uma inércia equivalente, para que não seja necessário introduzir a variação de inércia. Nesse modelo proposto por Branson, admite para todo o elemento de concreto uma única inércia, que representa os trechos fissurados e não fissurados. Baseia-se em um método semi-probabilístico, no qual se toma a variação da tensão ao longo da seção transversal e ao longo do comprimento de uma maneira simplificada, utilizando expressões empíricas que fornecem valores médios da inércia.

Dessa forma, Branson procura traduzir, aproximadamente, o efeito da fissuração do concreto, quando submetido à flexão, no cálculo de deformações imediatas. Esse procedimento pode ser utilizado para se obter o valor da inércia, intermediária ao valor no estágio I no final do estágio II (estádio II puro). De forma geral, a expressão obtida por Branson e simplificada pela ABNT NBR 6118:2023, para o cálculo da rigidez equivalente de uma viga de concreto, é dada por:

Equação 25:

$$(E \times I)_{eq, t0} = E_{cs} \times \left\{ \left(\frac{M_r}{M_s} \right)^3 \times I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_s} \right)^3 \right] \times I_2 \right\} \leq E_{cs} \times I_c \quad (2.32)$$

Em que:

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto

I_2 = momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, calculado com o coeficiente $a = E_s / E_{cs}$

M_s = momento fletor na seção crítica do vão considerado, momento máximo no vão para vigas biapoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações considerada nessa avaliação;

M_r = momento de fissuração do elemento estrutural, deve ser reduzido à metade para barras lisas;

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto

O momento de fissuração M_r para verificação do estado limite de deformação excessiva, de acordo com o item 17.3.1 da ABNT NBR 6118:2023, pode ser calculado por:

Equação 26:

$$M_r = \left(\frac{\alpha \times f_{ct,m} \times I_c}{y_t} \right) \quad (2.33)$$

Sendo:

α - 1,2 para seções em forma de “T” ou duplo “T” ;

α - 1,3 para seções I ou T invertido ;

α - 1,5 para seções retangulares ;

I_c - momento de inércia da seção bruta de concreto;

$f_{ct,m}$ = resistência média à tração do concreto, conforme item 8.2.5 da norma, dada por $f_{ct,m} = 0,3 \times F_{ck}^{2/3}$ (para o caso de estado de deformação excessiva).

y_t = distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada

Assim, a previsão da flecha imediata ou instantânea (sem o efeito da fluência), para vigas, pode ser feita a partir da equação da resistência dos materiais, válida para seções constantes ao longo da peça, considerando a inércia:

Equação 27:

$$a = \left(\frac{ac \times p \times l^4}{(E \times I)_{eq}} \right) \quad (2.34)$$

Em que:

p - carga definida por certa combinação (por exemplo, quase permanente);

l - vão da viga

$(E \times I)_{eq}$ - rigidez equivalente dada pela equação 25

ac - coeficiente que depende da estética do sistema considerado (simplesmente apoiado, contínuo) e do tipo de ações atuantes; é encontrado em livros de resistência dos materiais e de teoria das estruturas; no caso de vigas simplesmente apoiadas e carga uniformemente distribuída, $a_c = (5/384)$.

Para determinação das deformações excessivas diferidas no tempo, faz-se necessário calcular qual será a flecha máxima a qual estará submetida a viga. Desta forma,

Equação 28:

$$af = \left(\frac{\Delta \varepsilon}{1 + 50 \times p'} \right) \quad (2.35)$$

Em que:

af - Flecha diferida no tempo em centímetros

Equação 29:

$$p' = \left(\frac{As}{b \times d} \right) \quad (2.36)$$

(o valor de p' será ponderado no vão de maneira análoga ao cálculo de I_{eq});

As - área da armadura de compressão no trecho considerado;

ε - coeficiente função do tempo, sendo $\Delta\varepsilon = \varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)$;

$$\varepsilon(t) = (0,68 \times 0,996^t) \times 0,32 \quad \text{para } t = 0 \quad (2.37)$$

$$\varepsilon(t) = 2 \quad \text{para } t \geq 70 \text{ meses}$$

t - Tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha deferida;

t_0 - idade, em meses, relativa à data de aplicação da carga de longa duração; se as parcelas de cargas de longa duração forem adotadas em idades variadas então

Equação 30:

$$t_0 = \left(\frac{\sum P_i}{\sum P_i} \times t_{0i} \right) \quad (2.38)$$

P_i - parcelas de carga;

t_{0i} - idade, em meses, em que se aplicou cada parcela P_i

O valor da flecha total no tempo infinito ($a_{t,\infty}$) será $(1 + af)$ vezes a flecha imediata:

Equação 31:

$$a_{t,\infty} = a_{t,0} \times (1 + af) \quad (2.39)$$

2.3 Softwares de dimensionamento

O AltoQi Eberick é um software amplamente utilizado na engenharia civil, especialmente no Brasil. Ele é conhecido por sua capacidade de realizar análises estruturais complexas e dimensionamento de elementos de concreto armado. O aplicativo oferece uma interface intuitiva e funcionalidades abrangentes, que permitem aos engenheiros projetar e analisar estruturas com eficiência e precisão.

Uma das principais vantagens do Eberick é sua confiabilidade. O software é desenvolvido de acordo com as normas técnicas brasileiras e padrões internacionais de engenharia civil, garantindo a precisão dos resultados gerados. Além disso, ele passa por constantes atualizações e melhorias, acompanhando as evoluções tecnológicas e as mudanças nas regulamentações da área.

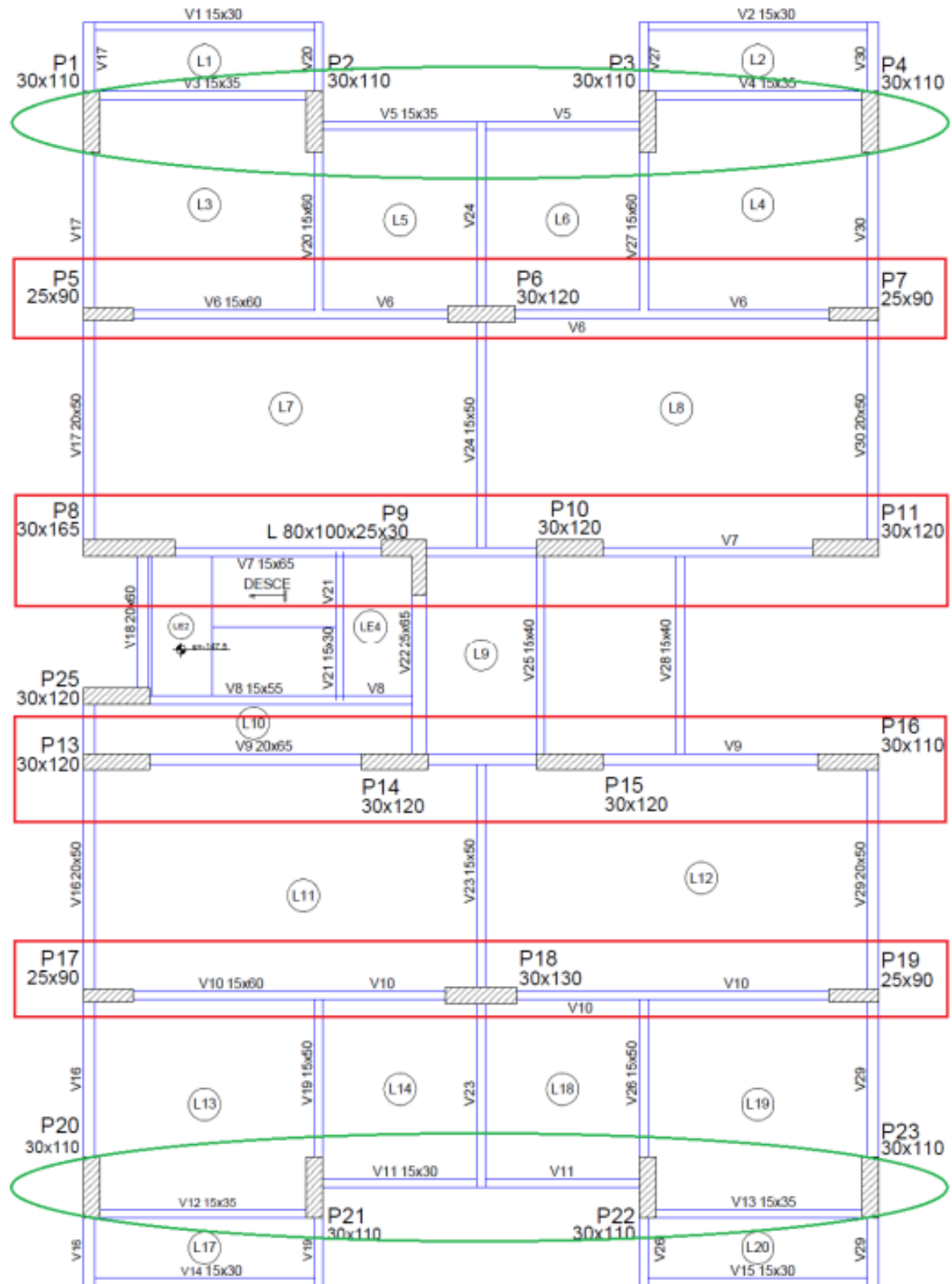
No contexto da análise de estruturas de concreto armado, o Eberick oferece uma gama de ferramentas e recursos específicos para vigas de concreto armado, permitindo realizar análises tanto no estado limite último (ELU) quanto no estado limite de serviço (ELS) das vigas. Isso significa que o software é capaz de verificar se a viga suporta as cargas aplicadas sem exceder sua capacidade de resistência (ELU) e se atende aos critérios de deformação e fissuração especificados (ELS).

O Eberick também possibilita a análise de flechas, que são as deformações verticais nas vigas, garantindo que essas deformações estejam dentro dos limites aceitáveis. Além disso, o software realiza análises de fissuração, identificando áreas onde podem ocorrer fissuras devido às tensões aplicadas.

Quanto ao dimensionamento da estrutura, o Eberick fornece os parâmetros necessários para o projeto das armaduras das vigas, garantindo sua capacidade de suporte de carga e segurança estrutural. Ele considera diversos aspectos, como as propriedades dos materiais, geometria da viga, cargas atuantes, configurações do vento entre outros, para determinar as dimensões e posicionamento adequados das armaduras.

Em um estudo realizado em Palmas/TO, foram analisados e comparados três modelos estruturais de um edifício de 26 pavimentos em concreto armado, utilizando o software Eberick V8 Gold da AltoQI. Os modelos incluíram Pórticos de contraventamento, Pórticos com Pilares-parede e Pórticos com Pilares-parede e Núcleo rígido. Constatou-se que todos os modelos apresentaram estabilidade satisfatória, sendo o modelo com Pórticos, Pilares-parede e Núcleo rígido o mais rígido, e o modelo com Pórticos e Pilares-parede o mais econômico devido ao menor consumo de materiais. Na figura 9, está representada a Planta de Forma do Pavimento tipo - Modelo Estrutural de contraventamento na direção x (Goes, 2016).

Figura 9 - Planta de Forma Eberick V8 Gold (2016).

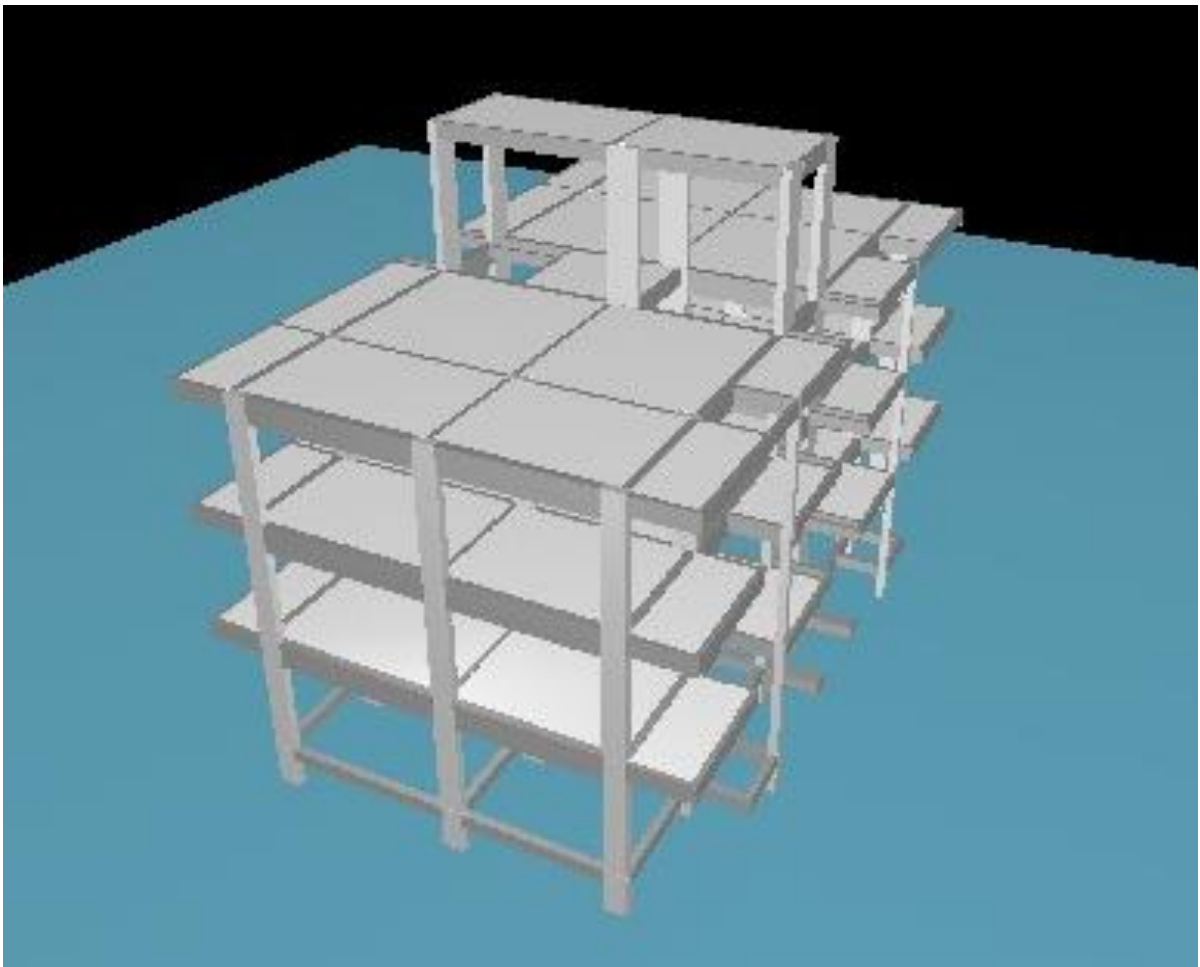


Fonte: (GOES, 2016).

Além do Eberick, existem outros softwares amplamente utilizados na engenharia civil para dimensionamento estrutural, cada um com suas próprias características e funcionalidades. Entre eles está o TQS, um software brasileiro amplamente utilizado para projetos de estruturas de concreto armado. O TQS oferece uma gama completa de soluções, desde o lançamento da estrutura até a geração de pranchas de detalhamento.

Um estudo que propôs o dimensionamento computacional da estrutura de um edifício em concreto armado. Utilizando o programa TQS, foi considerado o projeto arquitetônico de um edifício de 5 pavimentos, definindo um modelo estrutural e dimensionando vigas, pilares e lajes. As cargas atuantes no sistema estrutural foram determinadas, e os esforços nos elementos (vigas e pilares) e as respectivas áreas de aço foram calculados, demonstrando a eficácia do TQS no dimensionamento de estruturas de concreto armado (ASSIS 2019). Na Figura 10, pode-se verificar a modelagem feita dos pavimentos feita no TQS.

Figura 10 – Modelagem Estrutural TQS

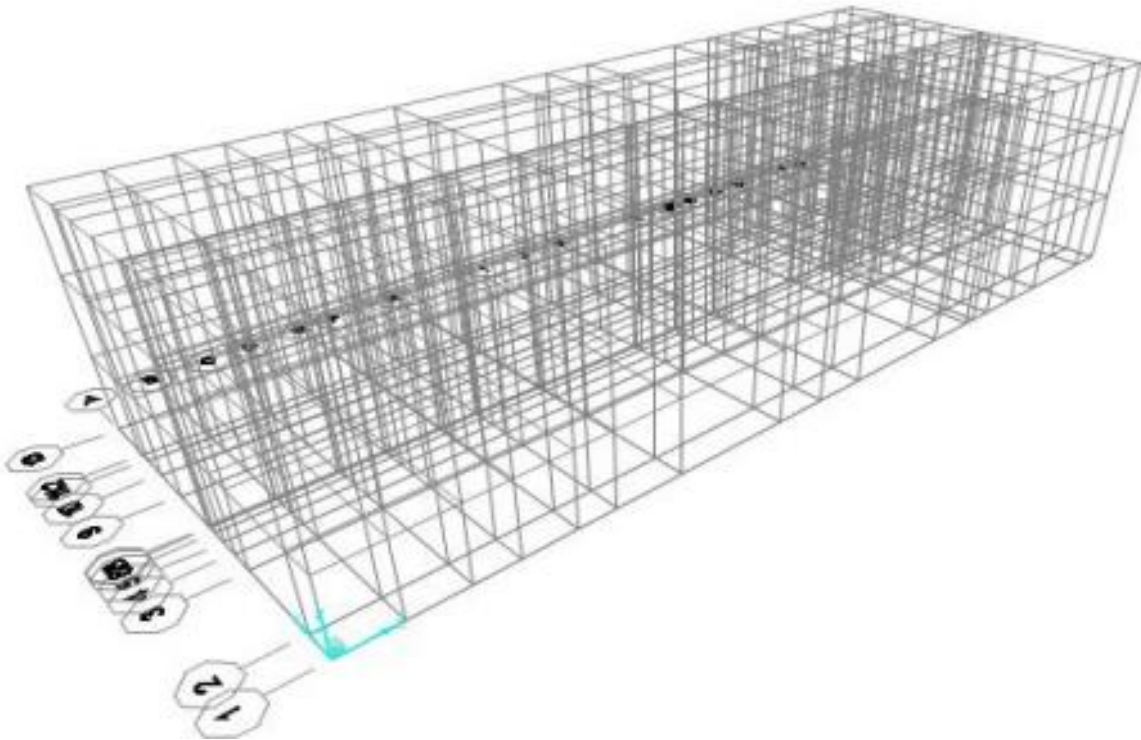


Fonte: ASSIS (2019).

Outro software é o SAP2000, desenvolvido pela Computers and Structures, Inc. Utilizado mundialmente, o SAP2000 é versátil e pode ser aplicado a uma vasta gama de tipos de estruturas, um exemplo do uso do software SAP2000 em trabalhos científicos pode ser observado em um estudo que avaliou a compatibilidade dos valores de deslocamentos nodais em uma estrutura metálica com perfis laminados.

Utilizando as versões de avaliação gratuita dos softwares SAP2000 versão 21 Fire e Cype3d 2020.a, foram comparados os resultados obtidos, descrevendo a metodologia de cálculo utilizada por cada programa. Esta análise permitiu verificar a precisão e a eficiência dos softwares no cálculo e dimensionamento de estruturas metálicas, destacando o SAP2000 como uma ferramenta valiosa no contexto acadêmico e profissional (SILVA 2019). Na Figura 11, podem ser observadas as linhas de referência em três dimensões e também suas nomenclaturas designadas pelo Sap2000.

Figura 11 – Linhas de Referência em Três Dimensões SAP2000



Fonte: (SILVA, 2019).

3 METODOLOGIA

3.1 Revisão Bibliográfica

Previamente, foi realizado um estudo detalhado do cálculo para o dimensionamento de vigas de concreto armado, conforme a ABNT NBR 6118:2023 e o trabalho de Carvalho e Figueiredo Filho (2014). Esse estudo incluiu a replicação completa dos cálculos descritos, identificando as variáveis, equações e métodos utilizados. As equações e valores foram implementados em planilhas Excel para verificar a precisão dos resultados. Com a validação bem-sucedida desses cálculos, as fórmulas foram adaptadas para a linguagem de programação utilizada no desenvolvimento do aplicativo. O intuito dessa etapa foi garantir que os resultados produzidos pelo aplicativo estivessem em conformidade com as referências estabelecidas pela ABNT e pelo trabalho de Carvalho e Figueiredo Filho.

3.2 Concepção do aplicativo

As variáveis e equações estudadas foram inicialmente implementadas na plataforma online Excel, com valores de entrada baseados nos cálculos de Carvalho e Figueiredo Filho (2014). A precisão dos resultados foi confirmada, permitindo a transição para a implementação das fórmulas no aplicativo. Optou-se pelo desenvolvimento de um aplicativo web, acessível em computadores, notebooks, smartphones e tablets, aproveitando o aumento constante da capacidade de processamento desses dispositivos. A escolha pela plataforma web se deu devido à sua ampla adoção global, suporte a multitarefa, código aberto e compatibilidade com diversos dispositivos.

3.3 Desenvolvimento do Aplicativo AppCalc

O aplicativo foi projetado para ser acessível e de fácil compreensão, a fim de reduzir a necessidade de conhecimento avançado sobre o dimensionamento de estruturas de concreto armado. O desenvolvimento utilizou três linguagens principais:

- **HTML:** Utilizado para a estruturação da interface do usuário. HTML define a disposição dos elementos visuais e garante que o layout do aplicativo seja organizado e amigável.

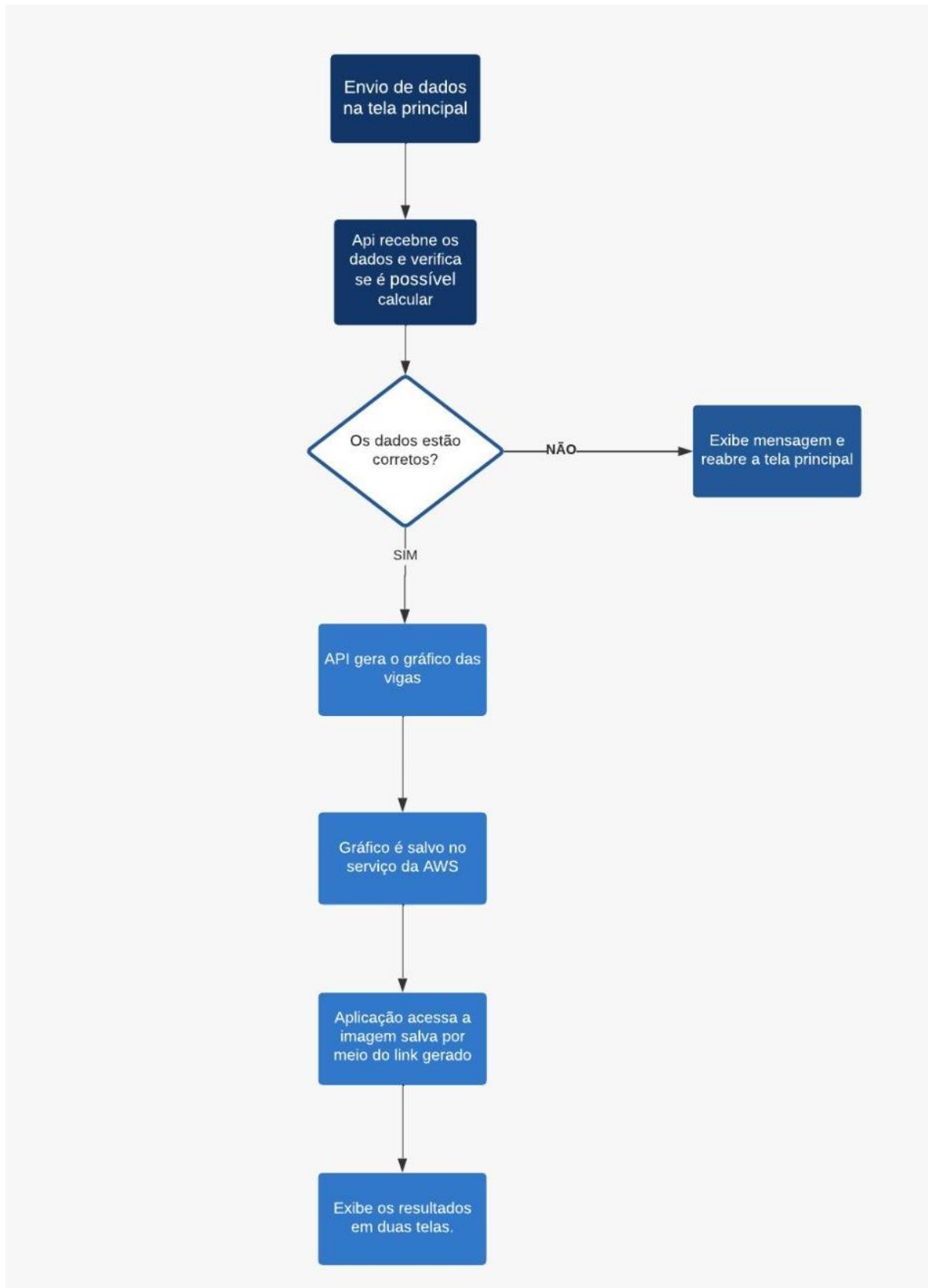
- **JavaScript:** Responsável pela criação de páginas web dinâmicas e interativas. JavaScript manipula elementos HTML e realiza cálculos iniciais no *frontend*, oferecendo uma experiência interativa e responsiva. Ele também valida entradas de dados e atualiza resultados instantaneamente.
- **Python:** Integrado para superar limitações na geração de imagens e processamento de dados complexos. Python utiliza bibliotecas como Matplotlib e PIL para gerar gráficos e imagens detalhadas, como a visualização de fissuração das vigas. A integração com o *frontend* foi realizada através de uma API, que permite a comunicação entre o *backend* em Python e o front end em HTML e JavaScript.

O processo de desenvolvimento envolveu a criação da interface com *HTML*, a dinamização com *JavaScript* e o processamento avançado com *Python*. O fluxo de dados foi estruturado para garantir uma comunicação eficiente entre o *frontend* e o *backend*, com dados inseridos pelos usuários na interface web sendo processados pela *API* em *Python* e os resultados retornados para exibição. Essa combinação de tecnologias foi necessária devido à complexidade das análises e visualizações das estruturas de concreto armado, especialmente na geração de imagens detalhadas da viga, como a definição precisa das posições das barras de aço.

Entretanto, apesar dessas soluções, o desenvolvimento enfrentou desafios, como a compatibilidade entre *JavaScript* e *Python*, que inicialmente se mostrou problemática. Embora a intenção inicial fosse utilizar apenas *JavaScript*, a necessidade de um processamento mais robusto demandou a integração de *Python*, o que acrescentou complexidade ao projeto. Por outro lado, a implementação dos cálculos manuais e a criação das páginas visuais do aplicativo foram relativamente simples. Essa abordagem permitiu que o aplicativo atendesse a diferentes níveis de conhecimento dos usuários, oferecendo análises detalhadas e visualizações claras.

O fluxograma seguinte, Figura 12, descreve a implementação computacional desenvolvida no projeto.

Figura 12 - Tela Inicial do APPCALC



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.3.1 AppCalc

O Appcalc possui uma interface simples, similar a algumas aplicações já conhecidas por parte dos usuários de softwares de cálculos de estruturas. Dentro das opções da interface, estão as dimensões da peça, onde serão inseridos os dados referentes à altura (h) da peça, à largura (bw) e o comprimento (l) da viga, conforme apresentados na figura 14, bem como as características dos materiais onde serão inseridas todas as informações referentes aos materiais (concreto e aço), bem como à classe de agressividade, além das solicitações à qual a peça está submetida.

O AppCalc possui uma tela de saída principal (Figura 13), na qual algumas verificações sobre a peça são mostradas, tais como, verificação do ELU e do ELS, bem como o domínio no qual se encontra a peça e duas opções de ação para o usuário escolher, detalhamento da peça (Figura 14) e relatório de cálculo (Figura 15).

Figura 13 - Tela Inicial do APPCALC

AppCalc

Especificação da Seção	Solicitação	Detalhamento
<p>h (m) <input type="text" value="ex: 17.0800"/></p> <p>bw (m) <input type="text" value="ex: 17.0800"/></p> <p>L (m) <input type="text" value="ex: 90"/></p> <div style="border: 1px solid #ccc; height: 80px; width: 100%;"></div>	<p>Mk (KNm) <input type="text" value="ex: 17.0800"/></p> <p>q (KN/m) <input type="text" value="ex: 17.0800"/></p> <p>g (KN/m) <input type="text" value="ex: 17.0800"/></p> <p>Vk (KN) <input type="text" value="ex: 17.0800"/></p> <p style="text-align: center;">Material</p> <p>Concreto <input type="text" value="20MPa"/></p> <p>Aço da Longitudinal <input type="text" value="CA-50"/></p> <p>Aço da Transversal <input type="text" value="CA-50"/></p>	<p>Armadura Longitudinal <input type="text" value="5 φ"/></p> <p>Armadura Transversal <input type="text" value="5 φ"/></p> <p style="text-align: center;">Classe de Agressividade</p> <p><input type="text" value="1"/></p>

© 2024 AppCalc. Todos os direitos reservados.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 14 - Tela de Saída Principal do APPCALC

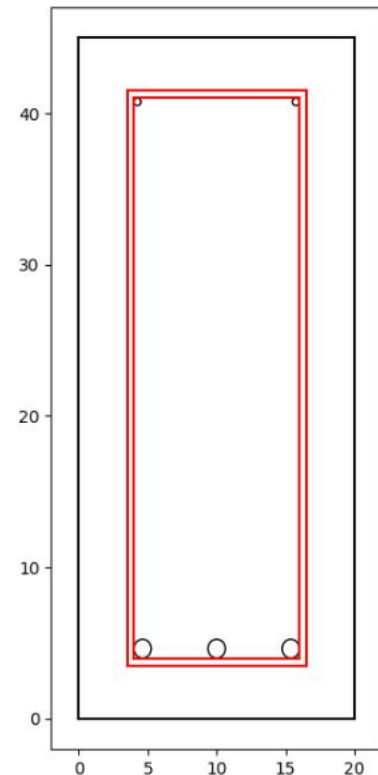
AppCalc

Resultados	
Domínio da viga	4.00
Flecha da Viga (cm)	0.32
Fissuração da Viga (mm)	0.17
Verificação do estado limite último	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="background-color: #007bff; color: white; padding: 10px 20px; border-radius: 5px; text-align: center; width: 45%;">DETALHAMENTO</div> <div style="background-color: #007bff; color: white; padding: 10px 20px; border-radius: 5px; text-align: center; width: 45%;">RELATÓRIO</div> </div>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 15 - Tela Saída - Detalhamento do APPCALC

Dados de Saída	
Nome da viga	N/A
Altura H (m)	0.45
Largura Bw (m)	0.20
Altura útil (m)	0.41
As longitudinal (cm ²)	3.68
As transversal (cm ²)	0.39



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 16 - Tela Saída - Relatório do APPCALC

AppCalc

Resultados	
Momento Fletor (kN.m)	55.41
Armadura Longitudinal (cm ²)	3 φ 1.25
Área de Aço Calculada (cm ²)	3.68
Área de Aço Efetiva (cm ²)	3.68
Esforço Cortante (kN)	66.47
Força Cortante Resistente de Cálculo (kN)	416.22
Armadura Transversal (cm ²)	15 5 φ C/ 20.00
Flecha Imediata (cm)	0.32
Flecha Diferida no Tempo (cm)	0.79
Fissuração (mm)	0.17

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.4 Estudo paramétrico

Um estudo paramétrico será realizado para analisar o desempenho das vigas biapoiadas sob diferentes condições de carregamento e comprimentos de vão. O objetivo deste estudo é explorar a capacidade do AppCalc em fornecer resultados precisos para diversas situações estruturais. Essa análise busca validar a eficácia do aplicativo ao enfrentar variações nos parâmetros de projeto, demonstrando sua aplicabilidade em cenários distintos de dimensionamento de vigas de concreto armado.

4 ESTUDO DE CASO

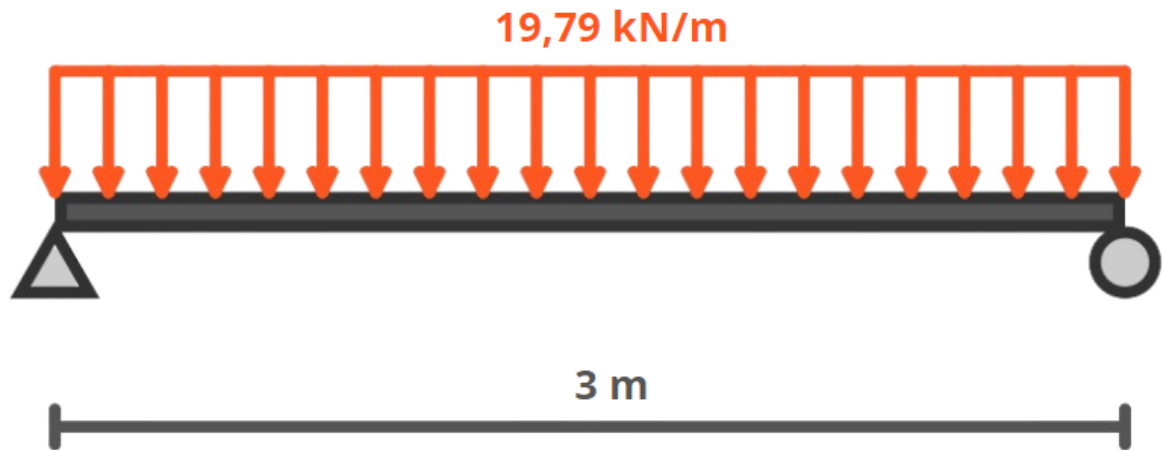
Para validar o método proposto neste trabalho, foi necessário comparar os resultados do dimensionamento de uma viga por três diferentes métodos. Primeiro, realizou-se o dimensionamento manualmente; em seguida, utilizando o aplicativo desenvolvido neste estudo; e, por fim, através do software de análise e cálculo estrutural Eberick. Dessa forma, pôde-se analisar e comparar as diferenças entre os resultados obtidos em cada abordagem.

O objeto de estudo se trata de uma viga retangular de concreto armado em que $b_w = 20$ cm; $h = 45$ cm; classe de agressividade ambiental = 2; diâmetro inicial longitudinal = 12,5 mm; diâmetro inicial transversal = 5mm. Esta peça está submetida a uma carga permanente de 27,85 kN/m e a uma carga acidental de 1,75 kN/m além de um momento característico de 39,58 kN/m e de um esforço cortante de 47,48 kN/m em um comprimento de 3 metros ilustrado na Figura 17.

Dados do Teste:

- Classe de Agressividade Ambiental 2 ($c = 3$ cm);
- Concreto Classe C30 ($F_{ck} = 30$ MPa);
- Brita 2 ($d_{máx}$, agregado = 25 mm);
- Aço CA-50 para armadura longitudinal e Aço CA-60 para estribos;
- Diâmetro Inicial (estimado): $\varphi_t = 5$ mm $\varphi = 12,5$ mm;
- Viga com dimensão 20 cm X 45 cm;
- $d = h - (c + \varphi_t + \varphi/2) = 45 - 3 - 0,5 - 1 = 40,5$ cm;
- Carga acidental $q = 1,75$ kN/m;
- Carga permanente $g = 27,85$ kN/m;
- $M_k = 39,58$ kN/m;
- $V_k = 47,48$ kN/m;
- α_e - agregado utilizado - granito = 1,0
- $\alpha_i = 0,875$
- Módulo de Elasticidade do Concreto $E_{cs} = 26852$ MPa
- Módulo de Elasticidade do Aço CA-50 $E_s = 210000$ Mpa;
- $L = 3$ m;

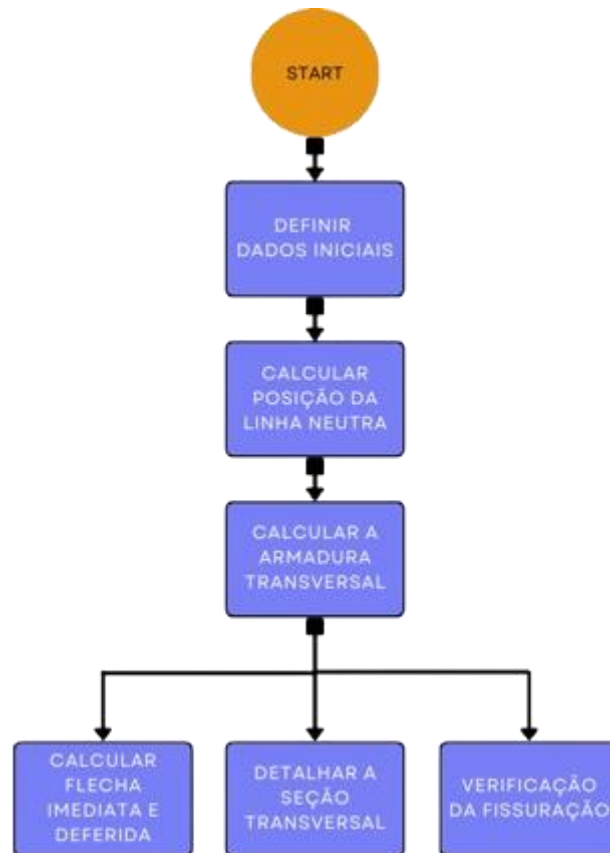
Figura 17 - Representação Longitudinal da Viga Proposta



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.1 Procedimento de Cálculo Manual

Figura 18 - Fluxograma do cálculo manual.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Primeiramente, a análise inicia com a definição da posição da linha neutra, essencial para determinar a área de aço necessária para resistir ao momento fletor. A partir da posição da linha neutra, é possível calcular a área de aço necessária para resistir ao momento, desde que atenda os limites de ductilidade, comparando com a solução adotada. O dimensionamento inclui a verificação da distância mínima entre as barras de aço e o cálculo da armadura transversal para suportar o esforço cortante.

A análise considera também o cálculo da fissuração, onde é fundamental avaliar a área crítica e o momento atuante para assegurar que a viga não apresente fissuras excessivas. Isso envolve a determinação do módulo de elasticidade do concreto e do aço, e a análise da tensão de tração no centro de gravidade da seção.

Por fim, são calculadas a flecha imediata e a flecha diferida no tempo, que são essenciais para garantir a deformação aceitável da viga ao longo de sua vida útil. A comparação entre os valores calculados e os critérios estabelecidos permite concluir que a viga está adequadamente dimensionada, atendendo aos requisitos de resistência, estabilidade e deformação, assim como ilustrado na Figura 18 e na Tabela 3

Tabela 3 – Resultados obtidos por meio do método de cálculo manual.

Resultado cálculo manual				
As	Asef	α_i	$\alpha_{t,\infty}$	w
3,28 cm ²	3,68 cm ²	0,31 cm	0,78 cm	0,17 mm
As - Área de aço calculada; $\alpha_{t,\infty}$ - flecha diferida no tempo;		Asef - Área de Aço Efetiva; w - fissuração		α_i - flecha imediata;

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2 Resultado - AppCalc

Na Figura 19, são exibidos os dados de entrada, inseridos pelo usuário, como as dimensões da peça (altura, largura e comprimento), as características dos materiais (concreto e aço), a classe de agressividade do ambiente, e as solicitações aplicadas à viga.

Figura 19 - Representação Longitudinal da Viga Proposta

AppCalc

Especificação da Seção

h (m)

bw (m)

L (m)

Solicitação

Mk (KNm)

q (KN/m)

g (KN/m)

Vk (KN)

Material

Concreto

Aço da Longitudinal

Aço da Transversal

Detalhamento

Armadura Longitudinal

Armadura Transversal

Classe de Agressividade

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 20 apresenta os primeiros resultados obtidos a partir dos dados inseridos. Esses resultados fornecem uma visão inicial sobre a adequação e segurança da estrutura analisada, permitindo ao usuário avaliar se os parâmetros estão dentro dos limites aceitáveis.

Figura 20 - Representação Longitudinal da Viga Proposta.

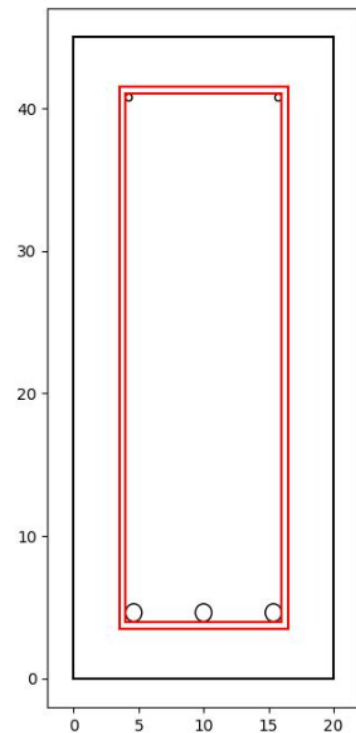
AppCalc	
Resultados	
Domínio da viga	4.00
Flecha da Viga (cm)	0.32
Fissuração da Viga (mm)	0.17
Verificação do estado limite último	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> DETALHAMENTO RELATÓRIO </div>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 21 ilustra o detalhamento da peça, por meio do qual o usuário pode visualizar as armaduras e outras especificações técnicas necessárias para a construção da viga.

Figura 21 - Representação Longitudinal da Viga Proposta

Dados de Saída	
Nome da viga	N/A
Altura H (m)	0.45
Largura Bw (m)	0.20
Altura útil (m)	0.41
As longitudinal (cm ²)	3.68
As transversal (cm ²)	0.39



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por fim, o AppCalc gera um relatório de cálculo detalhado, representado na Figura 22. Esse relatório compila todos os dados inseridos, as verificações realizadas, e os resultados obtidos como explicitados na Tabela 4.

Figura 22 - Tela de relatório com esforços e áreas de aço.



AppCalc

Resultados	
Momento Fletor (kN.m)	55.41
Armadura Longitudinal (cm ²)	3 φ 1.25
Área de Aço Calculada (cm ²)	3.68
Área de Aço Efetiva (cm ²)	3.68
Esforço Cortante (kN)	66.47
Força Cortante Resistente de Cálculo (kN)	416.22
Armadura Transversal (cm ²)	15 5 φ C/ 20.00
Flecha Imediata (cm)	0.32
Flecha Diferida no Tempo (cm)	0.79
Fissuração (mm)	0.17

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 4 – Resultados obtidos por meio do método do AppCalc

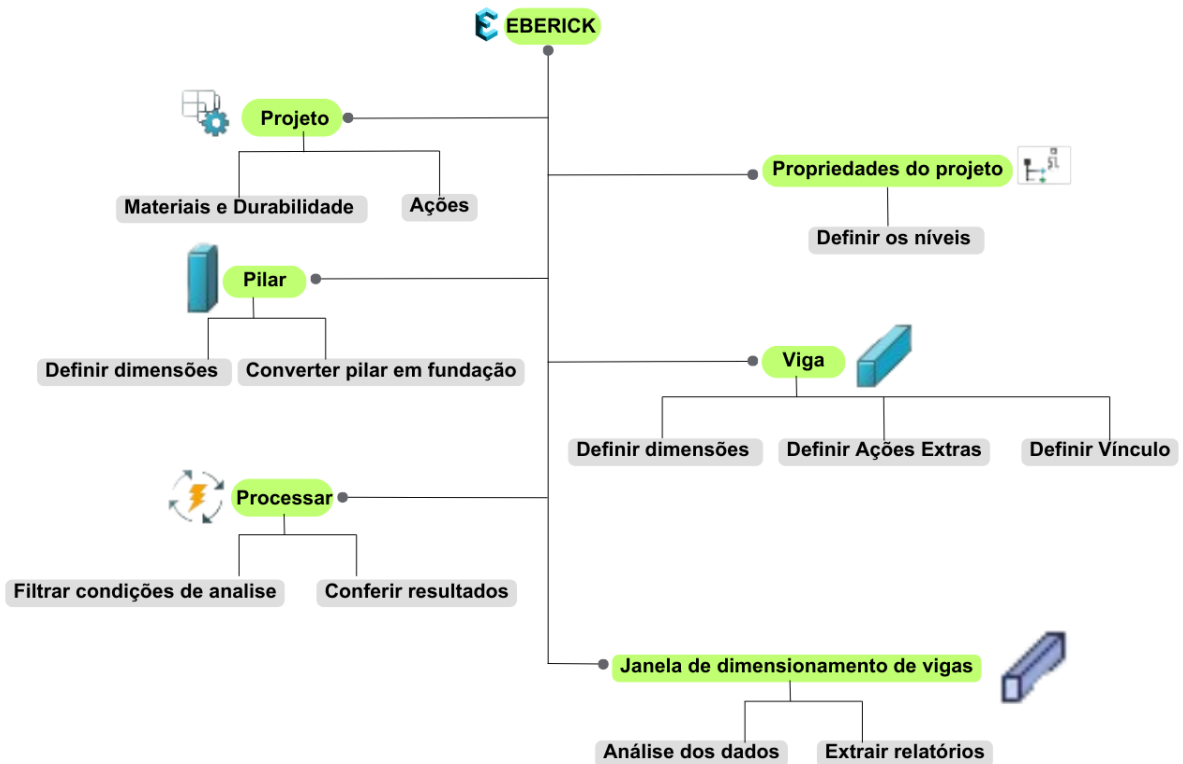
Resultado AppCalc				
A_s	A_{sef}	α_i	$\alpha_{t,\infty}$	w
3,27 cm ²	3,68 cm ²	0,31 cm	0,78 cm	0,17 mm
As - Área de aço calculada;		Asef - Área de Aço Efetiva;		α_i - flecha imediata;
$\alpha_{t,\infty}$ - flecha deferida no tempo;		w - fissuração.		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.3 AltoQi Eberick

O Figura 23 a seguir, apresenta as etapas necessárias para o processo de dimensionamento da viga no *AltoQi Eberick V8*.

Figura 23 - Fluxograma que descreve a modelagem da viga do estudo de caso no software EBERICK



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para modelar uma viga no software de cálculo estrutural, é preciso seguir uma sequência de etapas que garantirão a definição correta das condições de contorno e das características da peça.

Primeiramente, deve-se configurar o ambiente de trabalho para que o projeto atenda às especificações da viga, considerando as características dos materiais a serem utilizados, como a classe de concreto, o cobrimento necessário, as bitolas das barras de aço, e as condições de exposição do concreto armado. Esses parâmetros são essenciais para garantir a durabilidade e o desempenho estrutural da viga.

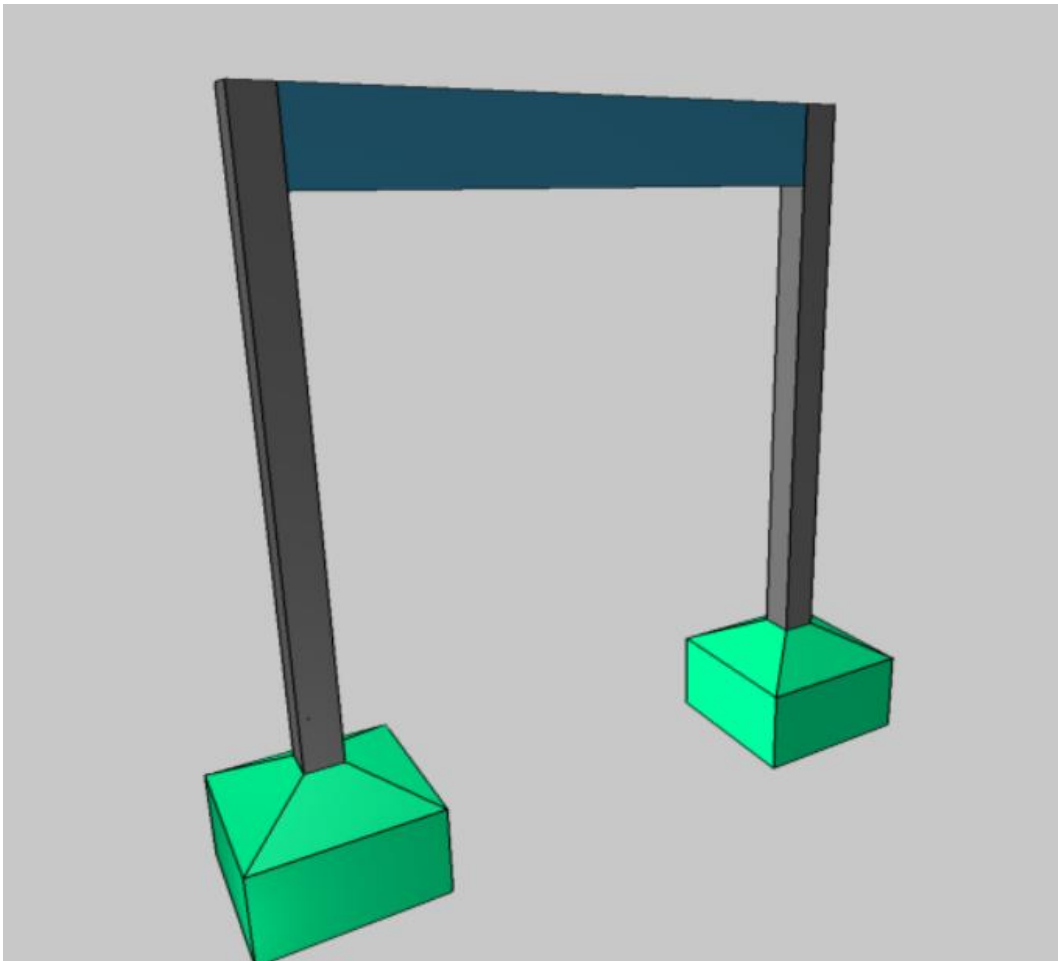
Em seguida, verifica-se as ações a serem consideradas nos cálculos correspondem àquelas estabelecidas nas fases anteriores do projeto. As ações incluem cargas permanentes e

variáveis, como o peso próprio da estrutura, sobrecargas de utilização e outras forças aplicadas. É importante que essas informações estejam consistentes ao longo do projeto.

Após a verificação das ações, procede-se ao lançamento dos níveis do projeto. Essa etapa envolve a definição dos pavimentos ou níveis onde a viga será inserida. Deve-se verificar que os níveis estão corretamente definidos, pois isso afetará a distribuição de cargas e o comportamento estrutural da viga.

Com os níveis definidos, realiza-se o lançamento da viga. A viga deve ser posicionada em uma estrutura que represente as condições de contorno da peça, ou seja, os elementos que a suportam. Para isso, é necessário inserir dois pilares com dimensões adequadas (por exemplo, 20 cm x 30 cm) e altura suficiente (como 3 metros) como indicado na Figura 24. Esses pilares servirão como apoios para a viga, garantindo que ela seja modelada de acordo com as condições reais.

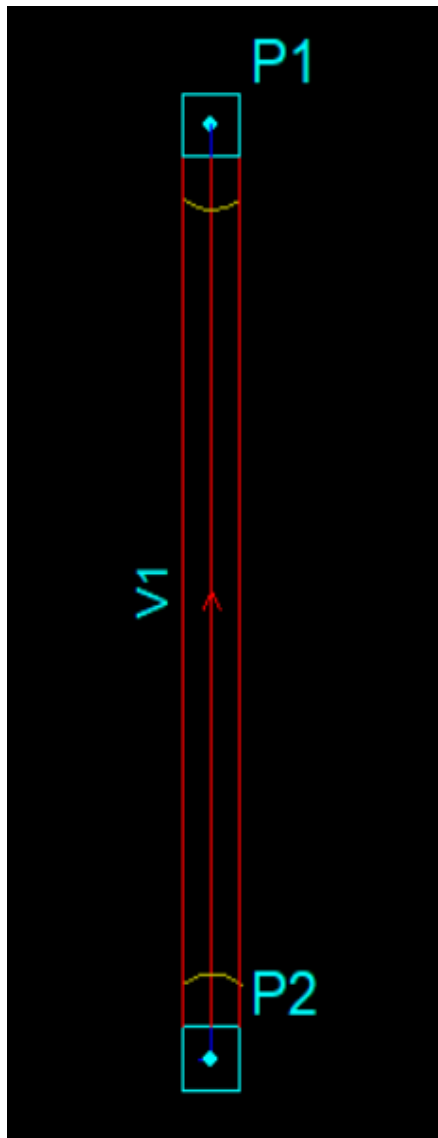
Figura 24 - Modelagem da Viga do Estudo de Caso No AltoQi Eberick.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No lançamento da viga, definem-se suas características principais, como altura, largura e tipo. Além disso, especificam-se as cargas que ela suportará. Essas cargas podem incluir tanto ações adicionais, como cargas aplicadas diretamente sobre a viga, quanto às ações já consideradas na estrutura, como o peso próprio. Também é essencial definir as suas condições de contorno, especificando se a viga será biapoiada, engastada ou terá outra configuração, exemplificado na Figura 25. Este parâmetro determina como a viga se comportará sob carregamento.

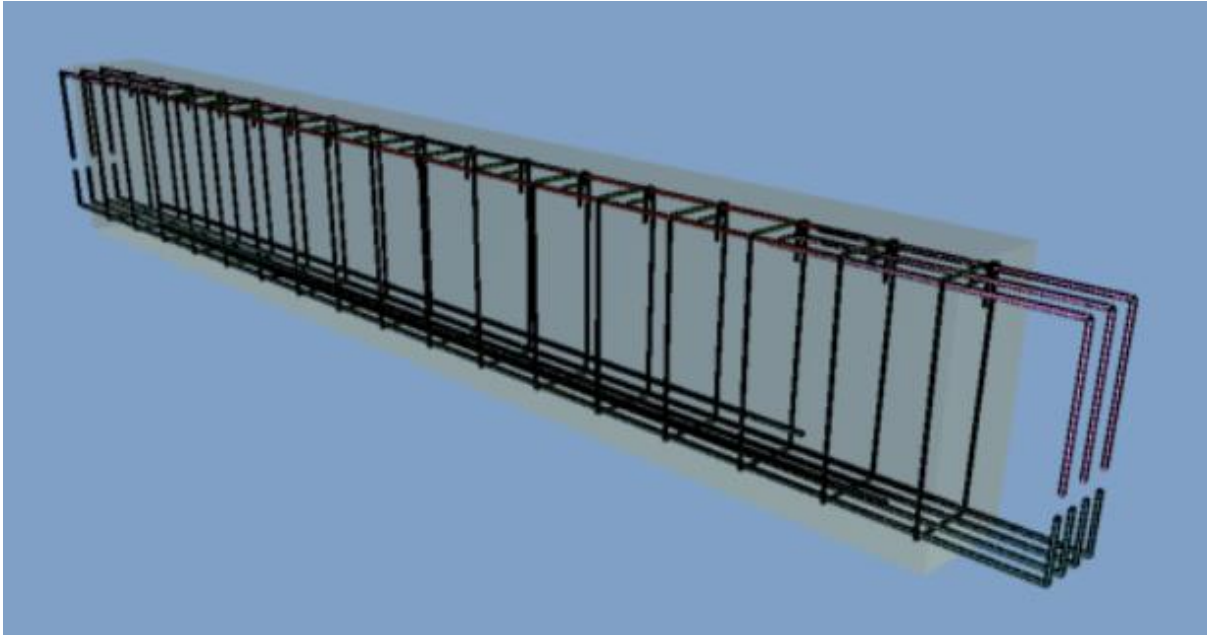
Figura 25 - Lançamento da Viga do Estudo de Caso No AltoQi Eberick.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Finalmente, realiza-se o processamento da estrutura. Isso envolve a análise do modelo estrutural considerando as configurações e cargas definidas. Nessa etapa, são gerados resultados que incluem esforços solicitantes, deslocamentos e armaduras necessárias, como apresentado na Figura 26. É fundamental revisar esses resultados para garantir que a viga esteja dimensionada corretamente.

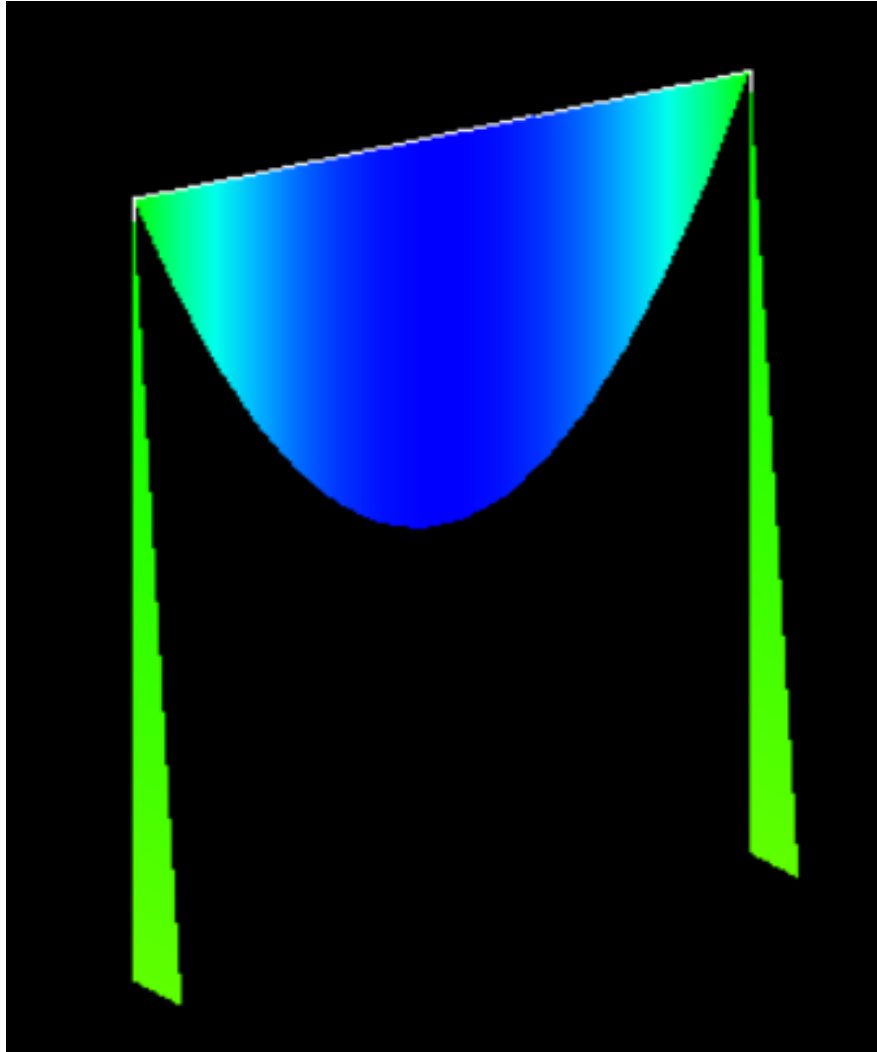
Figura 26 - Detalhamento da armadura da viga em 3D no AltoQi Eberick



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após o processamento, verificam-se os resultados detalhados da viga. As informações incluem esforços cortantes, momentos fletores, momentos torçores, deformações e a armadura necessária, como exemplificado na figura 27, que apresentam o momento fletor do elemento. Esses dados são apresentados de forma visual, facilitando a análise e a confirmação de que a viga atende às especificações do projeto. Caso necessário, também é possível gerar relatórios detalhados, que contêm todas as informações relevantes para o dimensionamento e a verificação da viga. A tabela 5, apresenta os resultados da modelagem no software.

Figura 27 - Momento Fletor da Viga do Estudo de Caso no AltoQi Eberick.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 5 – Resultados obtidos por meio do software AltoQi Eberick.

Resultado AltoQi Eberick				
As	Asef	α_i	$\alpha_{t,\infty}$	w
3,28 cm ²	3,68 cm ²	0,20 cm	0,4 cm	0,17 mm
As - Área de aço calculada;		Asef - Área de Aço Efetiva;		α_i - flecha imediata;
$\alpha_{t,\infty}$ - flecha deferida no tempo;		w - fissuração		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir do uso do aplicativo desenvolvido, com ênfase na sua validação. As etapas envolveram a comparação entre os resultados gerados pelo aplicativo e os parâmetros normativos, bem como a discussão das implicações desses resultados no contexto do dimensionamento estrutural.

5.1 Validação do App

Na Tabela 6, estão dispostos os resultados provenientes dos três métodos utilizados para o dimensionamento da viga de concreto armado.

Tabela 6 – Comparação dos resultados referentes aos três métodos utilizados para a resolução do estudo de caso proposto.

Meio para resolução do estudo de caso proposto			
Variáveis	Manual	Eberick	AppCalc
A_s	3,28 cm ²	3,28 cm ²	3,27 cm ²
A_{sef}	3,68 cm ²	3,68 cm ²	3,68 cm ²
α_i	0,31 cm	0,20 cm	0,31 cm
$\alpha_{t,\infty}$	0,78 cm	0,4 cm	0,78 cm
w	0,17 mm	0,17 mm	0,17 mm
A_s - Área de aço calculada; A_{sef} - Área de Aço Efetiva; α_i - flecha imediata; $\alpha_{t,\infty}$ - flecha deferida no tempo; w - fissuração			

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os resultados obtidos pelos três métodos de cálculo — manual, Eberick, e AppCalc — mostraram uma grande consistência, reforçando a confiabilidade do AppCalc como ferramenta de cálculo de vigas de concreto. Na comparação entre os valores para a área de aço (A_s), o AppCalc apresentou um resultado de 3,27 cm², muito próximo aos 3,28 cm² calculados tanto pelo método manual quanto pelo Eberick. A pequena diferença de 0,01 cm² pode ser atribuída a variações de arredondamento, sem impacto significativo nos resultados práticos.

Em relação à área de aço efetiva (A_{sef}), todos os métodos obtiveram o valor de 3,68 cm², confirmando que o AppCalc segue corretamente as diretrizes de cálculo estabelecidas. No que tange à flecha imediata (a_i), o AppCalc apresentou um resultado de 0,31 cm, alinhado com o valor obtido manualmente. Por outro lado, o Eberick indicou 0,20 cm, o que sugere a possibilidade de diferentes abordagens, tais como as configurações iniciais, como o coeficiente de fluência adotado, que pode variar entre os softwares, influenciando a deformação ao longo do tempo.

Além disso, a rigidez da ligação viga-pilar e o vão da viga podem ser modelados de forma diferente visto que o aplicativo considera as vigas apenas como sendo isostáticas, resultando em diferentes distribuições de esforços e deformações. Por fim, as características da seção transversal, como a inércia ou a resistência do material, também podem ser tratadas de maneira distinta, contribuindo para a divergência nos resultados. O mesmo padrão se observa na flecha no infinito ($a_{t,\infty}$), onde o AppCalc, assim como o cálculo manual, forneceu 0,78 cm, enquanto o Eberick apresentou um valor significativamente menor.

Por fim, na avaliação da abertura de fissuras (w), todos os métodos convergiram para o mesmo resultado de 0,17 mm, demonstrando a precisão do AppCalc nesse aspecto específico. Assim, a análise comparativa evidencia que o AppCalc calculou corretamente todos os parâmetros, mostrando-se uma ferramenta confiável e precisa para o cálculo de vigas de concreto, tanto em contextos acadêmicos quanto profissionais.

5.2 Aplicação do AppCalc

Após a validação do aplicativo AppCalc, foram realizadas simulações adicionais ilustradas na Figura 28 para avaliar o comportamento de vigas biapoiadas sob diferentes condições de carregamento e vão. Essas simulações permitiram explorar a capacidade do AppCalc em fornecer resultados precisos para variações nos parâmetros estruturais, reforçando sua aplicabilidade em cenários diversos.

Foram analisadas quatro configurações distintas de vigas biapoiadas, variando o carregamento distribuído e o comprimento da viga. Os resultados incluem a área de aço necessária (A_s , ef), a altura efetiva da seção (a_i), a altura total da seção ($a_{t,\infty}$) e a flecha máxima (w). As configurações simuladas foram:

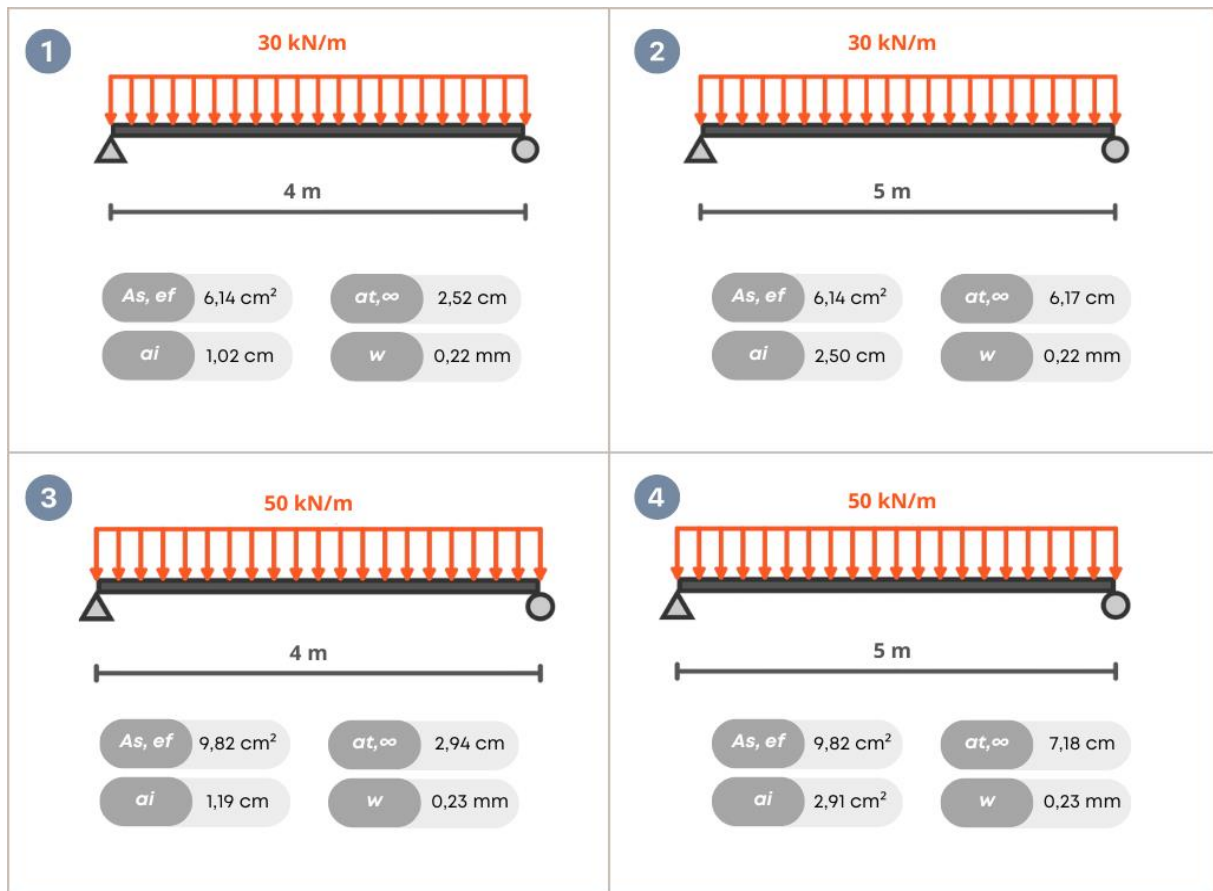
- **Simulação 1:** Carregamento de 30 kN/m em uma viga de 4 metros. Os resultados indicaram uma área de aço necessária ($A_{s, ef}$) de 6,14 cm², uma altura efetiva da seção

(a_i) de 2,52 cm, uma altura total da seção ($a_{t,\infty}$) de 1,02 cm e uma flecha máxima (w) de 0,22 mm.

- **Simulação 2:** Carregamento de 30 kN/m em uma viga de 5 metros. A área de aço necessária ($A_{s,ef}$) manteve-se em 6,14 cm², enquanto a altura efetiva da seção (a_i) aumentou para 6,17 cm e a altura total da seção ($a_{t,\infty}$) foi de 2,50 cm. A flecha máxima (w) continuou em 0,22 mm.
- **Simulação 3:** Carregamento de 50 kN/m em uma viga de 4 metros. Observou-se um aumento na área de aço necessária ($A_{s,ef}$) para 9,82 cm², com uma altura efetiva da seção (a_i) de 2,94 cm e uma altura total da seção ($a_{t,\infty}$) de 1,19 cm. A flecha máxima (w) foi de 0,23 mm.
- **Simulação 4:** Carregamento de 50 kN/m em uma viga de 5 metros. Neste cenário, a área de aço necessária ($A_{s,ef}$) permaneceu em 9,82 cm², com uma altura efetiva da seção (a_i) de 7,18 cm, uma altura total da seção ($a_{t,\infty}$) de 2,91 cm e uma flecha máxima (w) de 0,23 mm.

Os resultados obtidos demonstram que, à medida que o carregamento e o comprimento da viga aumentam, há uma demanda maior por área de aço e por seções mais robustas, com altura efetiva e total crescentes. No entanto, a flecha máxima manteve-se em níveis semelhantes, indicando que, mesmo com variações de carga e comprimento, o controle de deformações foi adequado. Esses resultados corroboram a precisão do AppCalc ao lidar com diferentes cenários estruturais, reafirmando sua validade como uma ferramenta confiável para o dimensionamento de vigas de concreto armado.

Figura 28 - Demonstração gráfica e resultado das simulações do AppCalc



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um aplicativo web voltado para o cálculo de vigas de concreto armado, buscando simplificar e agilizar o processo de dimensionamento apresentado ABNT NBR 6118:2023. A justificativa baseou-se na complexidade dos cálculos envolvidos no dimensionamento de estruturas de concreto armado, que exigem alta precisão para garantir a segurança e a economia das obras. Por meio da criação de uma ferramenta que integra uma interface intuitiva e cálculos precisos, o aplicativo desenvolvido mostrou-se eficaz tanto para uso acadêmico quanto profissional.

A aplicação facilita o entendimento dos princípios de dimensionamento, sendo uma ferramenta valiosa para estudantes e professores, além de oferecer suporte técnico aos engenheiros em atividade. Os testes realizados confirmaram que o aplicativo reduz significativamente o tempo necessário para os cálculos, mantendo a conformidade com as normas técnicas vigentes. O projeto demonstrou que a tecnologia pode ser uma aliada poderosa no ensino e na prática da engenharia civil, proporcionando soluções que atendem às necessidades do mercado e da educação.

Os objetivos propostos para este trabalho foram alcançados, comprovando a viabilidade do AppCalc como uma ferramenta eficiente para o cálculo e detalhamento de vigas de concreto armado. O aplicativo oferece uma interface intuitiva e acessível para os usuários, além de ter demonstrado precisão nos cálculos ao ser comparado com métodos tradicionais e software comercial, como o AltoQi Eberick.

É crucial, no entanto, ressaltar que a eficiência e a precisão dos cálculos realizados pelo AppCalc estão diretamente relacionadas à correta interpretação e inserção dos dados de entrada, pois os valores inconsistentes ou incorretos podem comprometer a confiabilidade dos resultados obtidos pelo aplicativo. Portanto, para uma experiência de uso otimizada, é imprescindível uma análise estrutural cuidadosa da viga proposta, bem como a manutenção da proporcionalidade dos esforços aplicados. Por exemplo, um aumento no momento fletor característico exige uma correspondente atualização dos demais parâmetros, como esforço cortante, carga permanente e carga acidental.

Para garantir tanto a precisão dos cálculos quanto uma experiência enriquecedora para o usuário, recomenda-se a utilização de exemplos práticos extraídos de livros, aulas ou outros

materiais didáticos. Essa abordagem reforça a exatidão dos cálculos e facilita a aprendizagem e a aplicação prática do aplicativo.

Com base nos resultados alcançados, sugere-se para trabalhos futuros a incorporação de funcionalidades adicionais ao AppCalc, como uma ferramenta de diagnóstico que alerte o usuário sobre a inconsistência dos dados inseridos, a inclusão de cálculos e detalhamento de vigas em T, detalhamento transversal e longitudinal das armaduras, uma função de otimização automática da viga conforme as necessidades específicas do usuário e uma relatório de cálculo automático. Essas melhorias potencializarão ainda mais a utilidade do AppCalc, ampliando seu escopo de aplicação e contribuindo para o avanço do dimensionamento de estruturas em concreto armado.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, N. O. **Processo de Dimensionamento de Estruturas em Concreto Armado Utilizando o Programa TQS** - Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil - 2019, 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, ABNT NBR 6118. Rio de Janeiro: ABNT, 2023, 238 p.
- BANDEIRA, A. **A Estruturas de Concreto Armado Segundo a ABNT NBR 6118/2014 - Notas de Aula**. Salvador, 2015. 9 p.
- BASTOS, P. **Vigas. Curso de Estruturas de Concreto II**. OUTUBRO/23. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista, Campus de Bauru. 2 p.
- BASTOS, P. **Vigas. Dimensionamento de Vigas de Concreto Armado à Força Cortante** NOVEMBRO/23. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista, Campus de Bauru, 17 p.
- BEZERRA, E. M. F. **Otimização multiobjetivo de lajes nervuradas em concreto armado**. 100 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- CAMACHO, J. S. **Concreto Armado I Estados Limites de Serviço: Fissuração Deformação** UNESP Faculdade de Engenharia Ilha Solteira - Departamento de Engenharia Civil - 2009, 8-9 p.
- CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. de F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a ABNT NBR 6118:2014**. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 415 p.
- FILHO, J. M. **Estudo das Vigas: Flexão Normal Simples** Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2015, 11-43 p.
- FREDLUND, D. G; MORGENSTERN, N. R. **Stress State Variables for Unsaturated Soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 103, 447-446, 1977
- GOES, H. B. V. **Análise do Comportamento Estrutural de um Edifício de 26 Pavimentos em Concreto Armado com Diferentes Sistemas de Contraventamento** - Centro Universitário Luterano de Palmas - 2016, 49 p.
- LEGGERINI, M. R. C. **Verificação do Estado Limite de Serviço de Abertura das Fissuras em Seções de Concreto Armado Submetidas à Flexão Simples** - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia - 2009, 35 p.
- PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios** Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, maio de 2007, 11 p.

SILVA D.G.G. Análise Numérica dos Deslocamentos em Função dos Esforços Solicitantes Atuantes em um Edifício Modelo em Estrutura Metálica com Utilização de Softwares - Faculdades Doctum de Caratinga - 2019, 38 p

SOUSA, P. H. E CALC-V: Aplicativo Android para Dimensionamento de Seções de Vigas de Concreto Armado Universidade Federal do Semi-Árido Mossoró 2018, 20 p.

APÊNDICE A - CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO APPCALC

```

async function calcularSoma() {
  // var xFormatado = x.toFixed(5);
  // var zformatado = z.toFixed(5);
  // localStorage.setItem("x", xFormatado);
  // localStorage.setItem("z", zformatado);

  //recebendo inputs
  try{
    var h = parseFloat(document.getElementById('h').value);
    saveToLocalStorage('AlturaHw', h);
    console.log('h:', h);

    var L = parseFloat(document.getElementById('L').value);
    saveToLocalStorage('Largura', L);
    console.log('L:', L);

    var q = parseFloat(document.getElementById('q').value);
    console.log('q:', q);

    var g = parseFloat(document.getElementById('g').value);
    console.log('g:', g);

    var classe = document.getElementById('classe').value;
    switch (classe) {
      case '1':
        var cobrimento = 2.5;
        break;
      case '2':
        var cobrimento = 3.0;
        break;
      case '3':
        var cobrimento = 4.0;
        break;
      case '4':
        var cobrimento = 5.0;
        break;
    }
    console.log('cobrimento:', cobrimento);

    var armLong = document.getElementById('armLong').value;
    switch (armLong) {
      case '5 φ':
        var bitolaUtilizada = 0.5;
        break;
      case '6,3 φ':
        var bitolaUtilizada = 0.63;
        break;
      case '8 φ':
        var bitolaUtilizada = 0.8;
        break;
      case '10 φ':
        var bitolaUtilizada = 1;
        break;
      case '12,5 φ':
        var bitolaUtilizada = 1.25;
    }
  }
}

```



```

        break;
    case '16 φ':
        var bitolaUtilizada = 1.6;
        break;
    case '20 φ':
        var bitolaUtilizada = 2;
        break;
    case '22,5 φ':
        var bitolaUtilizada = 2.25;
        break;
    case '25 φ':
        var bitolaUtilizada = 2.5;
        break;
    case '35 φ':
        var bitolaUtilizada = 3.5;
        break;
}
saveToLocalStorage('Aslong', armLong)
console.log('bitolaUtilizada:', bitolaUtilizada);

var armTrans = document.getElementById('armTrans').value;
switch (armTrans) {
    case '5 φ':
        var bitolaEstribo = 0.5;
        break;
    case '6,3 φ':
        var bitolaEstribo = 0.63;
        break;
}
saveToLocalStorage('AsTrans', armTrans)
console.log('bitolaEstribo:', bitolaEstribo);

var d =
    h -
    (bitolaUtilizada / (2 * 100) +
    bitolaEstribo / 100 +
    cobrimento / 100);
console.log('d:', d);
saveToLocalStorage('AlturaUtil', d)
var Mk = parseFloat(document.getElementById('Mk').value);
console.log('Mk:', Mk);
var Md = Mk * 1.4;
console.log('Md:', Md);
saveToLocalStorage('Md', Md)
var bw = parseFloat(document.getElementById('bw').value);
saveToLocalStorage('LarguraBw', bw)
console.log('bw:', bw);

var Fck = document.getElementById('Fck').value;
console.log('Fck:', Fck);
switch (Fck) {
    case '20MPa':
        var Fcd = 20000 / 1.4;
        var Fck = 20;
        break;
    case '25MPa':
        var Fcd = 25000 / 1.4;
        var Fck = 25;
        break;
}

```

```

    case '30MPa':
        var Fcd = 30000 / 1.4;
        var Fck = 30;
        break;
    case '40MPa':
        var Fcd = 40000 / 1.4;
        var Fck = 40;
        break;
    case '50MPa':
        var Fcd = 50000 / 1.4;
        var Fck = 50;
        break;
}
console.log('Fcd', Fcd);

//xmais
var term1 = 0.68 * d;
var term2 = Math.sqrt(
    Math.pow(0.68 * d, 2) - 4 * 0.272 * (Md / (bw * Fcd))
);
var denominator = 0.544;
var xMais = (term1 + term2) / denominator;
console.log('xMais', xMais);

//xmenos
var term1 = 0.68 * d;
var term2 = -Math.sqrt(
    Math.pow(0.68 * d, 2) - 4 * 0.272 * (Md / (bw * Fcd))
);
var denominator = 0.544;
var xMenos = (term1 + term2) / denominator;
console.log('xMenos', xMenos);

//braços de alavanca
var zMais = d - 0.4 * xMais;
var zMenos = d - 0.4 * xMenos;
console.log('zMais', zMais);
console.log('zMenos', zMenos);

var Fyk_Long = document.getElementById('Fyk_Long').value;
console.log('Fyk_Long:', Fyk_Long);
var Fyd_Long;
switch (Fyk_Long) {
    case 'CA-50':
        Fyd_Long = 50 / 1.15;
        break;
    case 'CA-60':
        Fyd_Long = 60 / 1.15;
        break;
}
console.log('Fyd_Long (kN/cm2)', Fyd_Long);

var Fyk_Trans = document.getElementById('Fyk_Trans').value;
console.log('Fyk_Trans:', Fyk_Trans);
var Fyd_Trans;
switch (Fyk_Trans) {
    case 'CA-50':
        Fyd_Trans = 50 / 1.15;
        break;
}

```

```

        case 'CA-60':
            Fyd_Trans = 60 / 1.15;
            break;
    }
    console.log('Fyd_Trans (kN/cm2)', Fyd_Trans);

    var x;
    var areaAco = 0;
    if (xMais > h) {
        areaAco = Md / (zMenos * Fyd_Long);
        x = xMenos;
    } else {
        areaAco = Md / (zMais * Fyd_Long);
        x = xMais;
    }
    console.log('x: ', x);
    console.log('areaAco (cm²)', areaAco);

    var areaAcoMin = (0.17 / 100) * bw * h;
    console.log('areaAcoMin', areaAcoMin);

    if (areaAco < areaAcoMin) {
        areaAco = areaAcoMin;
    }

    //calculo de ah (espaçamento horizontal)
    // o diametro agregado sera escolhido depois
    var diametroAgregado = 2.5;
    var ah3 = 1.2 * diametroAgregado;
    var ahLista = [2.0, bitolaUtilizada / 10, ah3];
    var ahMin = Math.max(...ahLista);
    // console.log('ahMin', ahMin);
    var areaAcoBitola = (Math.PI * (bitolaUtilizada * bitolaUtilizada))
/ 4;

    console.log('areaAcoBitola', areaAcoBitola);
    var numeroBarras = Math.ceil(areaAco / areaAcoBitola);
    console.log('numeroBarras', numeroBarras);
    var Asef = numeroBarras * areaAcoBitola;
    saveToLocalStorage('Asef', Asef)
    var As = Asef;
    saveToLocalStorage('As', As)
    console.log('Asef', Asef);
    var ah =
    (bw * 100 -
        (2 * cobrimento +
            2 * bitolaEstribo +
            numeroBarras * bitolaUtilizada)) /
    (numeroBarras - 1);
    // console.log('ah', ah);

    var fit = bitolaEstribo;
    console.log('fit: ', fit);
    var fi = bitolaUtilizada;
    saveToLocalStorage('bitolautilizada', fi)
    console.log('fi: ', fi);
    var n = numeroBarras;
    saveToLocalStorage('n', n)
    while (ah < ahMin) {
        n = n - 1;
    }

```

```

        if (n < 2) {
            // console.log('erro');
            break;
        } else {
            ah = (bw * 100 - (2 * cobrimento + 2 * fit + n * fi)) / (n
- 1);

            console.log('ah: ', ah);
            ah3 = 1.2 * diametroAgregado;
            console.log('ah3: ', ah3);
            ahMin = [2, fi, ah3];
            ahMin = Math.max(...ahMin);
            console.log('ahMin: ', ahMin);
        }
    }

    console.log('ah', ah);
    console.log('ahMin', ahMin);
    // colocar verificação de ah

    //calculo de av (espaçamento vertical)
    // o diametro agregado sera escolhido depois
    diametroAgregado = 2.5;
    var av3 = 0.5 * diametroAgregado;
    var avLista = [2.0, bitolaUtilizada / 10, av3];
    var avMin = Math.max(...avLista);
    console.log('avMin', avMin);

    // verificação das armaduras transversais
    var Vk = parseFloat(document.getElementById('Vk').value);
    console.log('Vk:', Vk);
    var Vsd = Vk * 1.4;
    console.log('Vsd:', Vsd);
    saveToLocalStorage('Vsd', Vsd)
    var FckMPa = (Fcd * 1.4) / 1000;
    console.log('FckMPa:', FckMPa);
    var Fctm = 0.3 * Math.pow(FckMPa, 2 / 3);
    console.log('Fctm:', Fctm);
    var Fywk = Fyd_Trans * 1.15 * 10;
    console.log('Fywk:', Fywk);
    var roMin = 0.2 * (Fctm / Fywk);
    console.log('roMin:', roMin);

    var Vrd2 = 0.27 * (1 - FckMPa / 250) * (FckMPa / 14) * bw * d *
10000;

    console.log('Vrd2:', Vrd2);
    saveToLocalStorage('Vrd2', Vrd2)
    var Vc = (0.09 * Math.pow(FckMPa, 2 / 3) * bw * d * 10000) / 10;
    console.log('Vc:', Vc);
    var Vsw = Vsd - Vc;
    Vsw = Vsw * (-1)
    console.log('Vsw:', Vsw);
    var As_s = Vsw / (0.9 * d * Fyd_Trans);
    console.log('As_s:', As_s);
    var As_sMin = roMin * bw * 100 * 100;
    console.log('As_sMin:', As_sMin);
    if (As_s > As_sMin) {
        var AMaior = As_s;
    } else {
        var AMaior = As_sMin;
    }

```

```

    }
    var numEstriboPorMetro = Math.ceil(
        AMaior / (2 * ((Math.PI * (bitolaEstribo * bitolaEstribo)) /
4))
    );
    var numEstriboTotal = numEstriboPorMetro * L;
    console.log(numEstriboPorMetro);
    console.log('numEstriboPorMetro:', numEstriboPorMetro);
    console.log(
        'area de aco da bitola transversal:',
        (Math.PI * (bitolaEstribo * bitolaEstribo)) / 4
    );
    var espacamentoEstribos = (100 / numEstriboPorMetro).toFixed(2);
    console.log('espacamentoEstribos:', espacamentoEstribos);
    var espacamentoMaxEstribos = [0.6 * d * 100, 30];
    var espacamentoMaxEstribos = Math.min(...espacamentoMaxEstribos);
    console.log('espacamentoMaxEstribos:', espacamentoMaxEstribos);
    // var L = 1 ;
    var detalhamentoFinalDosEstribos = `${numEstriboTotal} ${armTrans}
C/ ${espacamentoEstribos}`;
    console.log(
        'detalhamentoFinalDosEstribos ',
        detalhamentoFinalDosEstribos
    );
    saveToLocalStorage('detalhamentoFinalDosEstribos',
detalhamentoFinalDosEstribos)

    //SeçãoDupla
    var x_045d = 0.45 * d;
    localStorage.setItem('x_045d', x_045d);
    console.log('x_045d: ', x_045d);

    var MdlimiteX045d =
        (0.68 * x_045d * d - 0.272 * x_045d * x_045d) * Fcd * bw;
    console.log('MdlimiteX045d: ', MdlimiteX045d);
    //CalculoArmaduraDupla
    var dLinha =
        cobrimento / 100 + bitolaUtilizada / (2 * 100) + bitolaEstribo
/ 100;
    console.log('dLinha: ', dLinha);
    var As2;
    var As1;
    var numeroBarraAs1;
    var numeroBarraAs2;
    var areaDupla;
    if (x > x_045d) {
        areaDupla = true;
        As2 = (Mk * 1.4 - MdlimiteX045d) / ((d - dLinha) * Fyd_Long);
        As1 = MdlimiteX045d / ((d - 0.4 * x_045d) * Fyd_Long);
        As = As1 + As2;
        numeroBarraAs1 = As1 / areaAcoBitola;
        numeroBarraAs2 = As2 / areaAcoBitola;
        console.log('numeroBarraAs1: ', numeroBarraAs1);
        console.log('numeroBarraAs2: ', numeroBarraAs2);
    } else {
        areaDupla = false;
        As2 = 0;
        As1 = 0;
        As = Asef;
    }

```

```

        numeroBarraAs1 = As1 / areaAcoBitola;
        numeroBarraAs2 = As2 / areaAcoBitola;
    }
    console.log('As1: ', As1);
    console.log('As2: ', As2);
    console.log('As: ', As);

// VARIÁVEIS PARA O CALCULO DE TRAÇÃO
var Eci = 5600 * Math.sqrt(Fck);
console.log('Eci: ', Eci);
var ai = 0.8 + (0.2 * Fck) / 80;
if (ai < 1) {
    ai = 1;
}
saveToLocalStorage('ai', ai);
console.log('ai: ', ai);

var Ecs = 0.85 * Eci;
console.log('Ecs: ', Ecs);
var Esi = 210000;
var ae = Esi / Ecs; // depende do tipodeconcretousado
console.log('ae: ', ae);

var a1 = (bw * 100) / 2;
console.log('a1: ', a1);
var a2 = ae * Asef;
console.log('a2: ', a2);
var a3 = -(d * 100 * ae * Asef);
console.log('a3: ', a3);

// Fissuração
var xii;
if (
    (-a2 + Math.sqrt(Math.pow(a2, 2) - 4 * a1 * a3)) / (2 * a1) > 0
    &&
    (-a2 + Math.sqrt(Math.pow(a2, 2) - 4 * a1 * a3)) / (2 * a1) < h
    * 100
) {
    xii = (-a2 + Math.sqrt(Math.pow(a2, 2) - 4 * a1 * a3)) / (2 *
a1);
} else {
    xii = (-a2 - Math.sqrt(Math.pow(a2, 2) - 4 * a1 * a3)) / (2 *
a1);
}
console.log('xii: ', xii);
saveToLocalStorage('xii', xii);
var inercia2;
if (areaDupla) {
    inercia2 =
        (bw * 100 * Math.pow(xii, 3)) / 3 +
        ae * As * Math.pow(xii - d * 100, 2) +
        ((ae - 1) * Math.pow(As2 * (xii - dLinha), 2)) /
Math.pow(10, 8);
} else {
    inercia2 =
        ((bw * 100 * xii * xii * xii) / 3 +
        ae * As * Math.pow(xii - d * 100, 2)) /
        100000000;
}
}

```

```

console.log('ineracia2: ', inercia2);
var mat = ((g + q * 0.4) / (g + q)) * Mk; // g e q sao input's
var tensaoDeTracao = ((mat / inercia2) * ae * (d - xii / 100)) /
1000;
console.log('tensao de tracao: ', tensaoDeTracao);
//-----
const dataToSend = {
  width: bw,
  height: h,
  agressClass: cobertura,
  quantBar: numeroBarras,
  dBar: bitolaUtilizada,
  dAgreg: diametroAgregado,
  dEstribo: bitolaEstribo,
  av: avMin,
};
console.log(dataToSend)
// Call the fetchData function and handle the Promise
const data = await fetchData(dataToSend);
if (data.success) {
  acri = data.calcArea;
  processData(data.calcArea, data.imagePath);
  saveToLocalStorage('imagePath', data.imagePath);
  console.log('Caminho da imagem testes: ', data.imagePath);
  console.log('acritestes: ', acri);
} else {
  alert('Por favor corrija os valores enviados.');
```

```

return false;
}

var pri = areaAcoBitola / acri;
console.log('pri: ', pri);

var priCalc = ((4 / pri) + 45);
var wk1 = (bitolaUtilizada * tensaoDeTracao * priCalc) /
(12.5 * 2.25 * Esi);

console.log('Esi', Esi);
console.log('wk1: ', wk1);
var wk2 =
  (bitolaUtilizada * 3 * tensaoDeTracao * tensaoDeTracao) /
  (12.5 * 2.25 * Esi * Fctm);
console.log('wk2: ', wk2);
var inercia = (h * h * h * bw) / 12;
console.log('ineracia: ', inercia);
// var q = 10; // g e q sao input's
// var g = 15; // g e q sao input's
console.log('mat: ', mat);
var mr = (1.5 * inercia * Fctm * 100) / (h * 0.5);
console.log('mr: ', mr);
var ieq =
  (Ecs / 10) *
  ((mr / mat) * (mr / mat) * (mr / mat) * inercia2 +
  (1 - (mr / mat) * (mr / mat) * (mr / mat) - inercia));
console.log('ieq: ', ieq);
console.log('Ecs*ineracia*100000000: ', Ecs * inercia * 100000000);
if (ieq >= Ecs * inercia * 100000000) {
  ieq = 'mensagem de erro';
}

```

```

    console.log('ieq: ', ieq);
    // var L = 300 ; // input
    // console.log("L: ", L);
    var L = L * 100;
    console.log(
metros `
        `O L que está sendo usado é ${L} centímetros ou ${L / 100}
    );

    var acaoPermanente = g;
    var acaoQuasePermanente = (g + 0.3 * q) ;
    //=((C134+C135)+0,3*4)*0,5
    var acaoRara = (g + q) ; // =(C134+C135+4)*0,5
    console.log(`acaoQuasePermanente: ${acaoQuasePermanente}`);

    var Mmax_acao_permanente = (acaoPermanente * (L / 100) ** 2) / 8;
    var Mmax_acao_quase_permanente =
        (acaoQuasePermanente * (L / 100) ** 2) / 8;
    var Mmax_acao_rara = (acaoRara * (L / 100) ** 2) / 8;
    console.log(
        `Mmax_acao_quase_permanente: ${Mmax_acao_quase_permanente}`
    );

    var MrMmax_acao_permanente = mr / Mmax_acao_permanente;
    var MrMmax_acao_quase_permanente = mr / Mmax_acao_quase_permanente;
    var MrMmax_acao_rara = mr / Mmax_acao_rara;
    console.log(
        `MrMmax_acao_quase_permanente: ${MrMmax_acao_quase_permanente}`
    );

    var Im_acao_permanente =
        MrMmax_acao_permanente ** 3 * inercia +
        (1 - MrMmax_acao_permanente ** 3) * inercia2;
    var Im_acao_quase_permanente =
        MrMmax_acao_quase_permanente ** 3 * inercia +
        (1 - MrMmax_acao_quase_permanente ** 3) * inercia2;

    var Im_acao_rara =
        MrMmax_acao_rara ** 3 * inercia +
        (1 - MrMmax_acao_rara ** 3) * inercia2;
    console.log(`Im_acao_quase_permanente:
    ${Im_acao_quase_permanente}`);

    var pIM_acao_permanente = acaoPermanente / Im_acao_permanente;
    var pIM_acao_quase_permanente =
        acaoQuasePermanente / Im_acao_quase_permanente;
    var pIM_acao_rara = acaoRara / Im_acao_rara;
    console.log(`pIM_acao_quase_permanente:
    ${pIM_acao_quase_permanente}`);

    var a_acao_permanenteMetros =
        (pIM_acao_permanente * (L / 100) ** 4 * 5) / (384 * Ecs *
1000);
    var a_acao_quase_permanenteMetros =
        (pIM_acao_quase_permanente * (L / 100) ** 4 * 5) / (384 * Ecs *
1000);
    var a_acao_raraMetros =
        (pIM_acao_rara * (L / 100) ** 4 * 5) / (384 * Ecs * 1000);
    console.log(

```



```

        `a_acao_quase_permanenteMetros:
    ${a_acao_quase_permanenteMetros}`
    );

    var a_acao_permanenteCentimetro = a_acao_permanenteMetros * 100;
    var a_acao_quase_permanenteCentimetro =
        a_acao_quase_permanenteMetros * 100;
    var a_acao_raraCentimetro = a_acao_raraMetros;
    console.log(
        `a_acao_permanenteCentimetro: ${a_acao_permanenteCentimetro}
    ,a_acao_quase_permanenteCentimetro: ${a_acao_quase_permanenteCentimetro}
    ,a_acao_raraCentimetro: ${a_acao_raraCentimetro}`
    );

    var ai = a_acao_raraCentimetro - a_acao_permanenteCentimetro;

    saveToLocalStorage('a_acao_permanenteCentimetro',
    a_acao_permanenteCentimetro);
    console.log(
        `ai = ${ai}`
    );

    var amax = L / 250;
    console.log('amax: ', amax);
    var plinha = As2 / (bw * d);
    console.log('plinha: ', plinha);
    var x = 0.47;
    // console.log("tensao de tracao: ", tensaoDeTracao);
    var e0 = 0.68 * 0.996 ** x * x ** 0.32;
    console.log('e0: ', e0);
    var einf = 2;
    // console.log("tensao de tracao: ", tensaoDeTracao);
    var af = (einf - e0) / (1 + 50 * plinha);
    console.log('af: ', af);
    a_acao_quase_permanenteCentimetro =
    a_acao_permanenteCentimetro.toFixed(2);
    console.log('Ação convertida', a_acao_quase_permanenteCentimetro)
    var aflu = a_acao_quase_permanenteCentimetro * (1 + af);
    saveToLocalStorage('aflu', aflu)
    console.log('aflu', aflu)
    var dominio;
    if(x < d * 0.259){
        dominio = `2`
    }else if (x > d * 0.259 && x < d * 0.7709) {
        dominio = `3`
    } else if (x > d * 0.7709) {
        dominio = `4`
    } else {
        dominio = `O valor de x não passou nos testes, sendo x igual à
    ${x}`;
    }
    saveToLocalStorage('dominio', dominio);
    console.log(dominio)

    var wk ;
    if(wk1>wk2) {
        wk = wk1 * 10;
        console.log(`wk1 é ${wk1}, sendo ele menor que wk2 que é
    ${wk2}. Logo wk é ${wk1}.`)
    }

```

```
    } else {
      wk = wk2 * 10;
      console.log(`wk2 é ${wk2}, sendo ele menor que wk1 que é
${wk1}. Logo wk é ${wk2}.`);
    }
    saveToLocalStorage('wk', wk);

    var AsefEst = (2 * ((Math.PI * (bitolaEstribo * bitolaEstribo)) /
4));

    saveToLocalStorage('AsefEst', AsefEst);

    return true;
  }
  catch(error){
    console.error('Error:', error);
    return false;
  }
}
```

Link do repositório: <https://github.com/Thomashq/appcalc/blob/main/js/iBeam.js>

APÊNDICE B - RESULTADO CÁLCULO MANUAL

RESULTADO CÁLCULO MANUAL	
Variáveis	Resultado
LN	0,04 cm
As	3,28 cm ²
A_{sef}	3,68 cm ²
A_h	4,62 cm
V_{sd}	86,14 kN
V_{rd2}	412,40 kN
V_c	70,38 kN
V_{sw}	16,14 kN
A_{sws}	1,93 cm ²
n	5
s	20 cm
A_{cri}	135,135 cm ²
P_{ri}	0,016
X_{II}	9 cm
M_{at}	38,17 kN.m
I_{xIIo}	33259,38 cm ⁴
M_r	2,93 kN.m
(EI)_{eq,t0}	9371,348 kN.m ²
α_i	0,31 cm
α_{t,∞}	0,78 cm
w	0,17 mm

LN - Linha Neutra; As - Área de aço calculada; A_{sef} - Área de Aço Efetiva; A_h - Distância Horizontal; V_{sd} - Esforço cortante de cálculo; V_{rd2} - Esforço cortante resistente de cálculo; V_c - Resistência ao esforço cortante do concreto; V_{sw} - Resistência ao esforço cortante do estribo; A_{sws} - Área de aço do estribo; n - Número de estribos por metro; s - espaçamento longitudinal dos estribos; A_{cri} - Área de concreto que compreende uma barra de aço; P_{ri} - Razão entre área de aço de uma bitola e A_{cri}; X_{II} - Momento de inércia no estágio 2; M_{at} - Momento atuante; M_r - Momento de fissuração; (EI)_{eq,t0} - Rigidez equivalente; α_i - flecha imediata; α_{t,∞} - flecha deferida no tempo; w - fissuração

