

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VICTORIA DA SILVA PINTO

**ABORDAGEM COMPUTACIONAL PARA O REFORÇO DE VIGAS COM
ABERTURAS NA ALMA**

CAMPO MOURÃO

2025

versão 11.0 (abr.25)

VICTORIA DA SILVA PINTO

**ABORDAGEM COMPUTACIONAL PARA O REFORÇO DE VIGAS COM
ABERTURAS NA ALMA**

Computational approach for reinforcement of beams with web openings

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Douglas Fukunaga Surco

Coorientadora: Thelma Pretel Brandão Vecchi

Campo Mourão

2025



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VICTORIA DA SILVA PINTO

**ABORDAGEM COMPUTACIONAL PARA O REFORÇO DE VIGAS COM
ABERTURAS NA ALMA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06 de novembro de 2025.

Douglas Fukunaga Surco
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Angelo Giovanni Bonfim Corelhano
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jorge Luís Nunes de Góes
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Campo Mourão

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por todo discernimento, por guiar meus passos e iluminar meu caminho até aqui.

Agradeço aos meus pais, por serem o alicerce que sustentou cada passo desta caminhada. Por sempre estarem dispostos a me escutar e auxiliar. Por me apoiarem a cada nova etapa e, acima de tudo, por acreditarem na minha capacidade mais que eu mesma.

Aos meus avós, por cada vez que perguntaram como estava a “escola”. Em especial à dona Elena, por ser meu refúgio diário entre um chimarrão e outro, tornando meus dias difíceis mais leves.

Aos meus amigos e companheiros de jornada, que estiveram presentes nos momentos de desespero e nos de alegria entre trabalhos e provas. Agradeço especialmente, a Bia, minha parceira fiel desde o início, por dividir todos os momentos. Obrigada por ser minha ouvinte incansável e por vibrar cada vitória. Te levo comigo para além daqui.

Ao meu primo Marcos Vinicius, que, sem talvez imaginar, foi quem plantou em mim a semente da engenharia.

Aos meus professores, deixo minha admiração e gratidão. Em especial, ao Prof. Dr. Douglas Fukunaga Surco, por todo auxílio, paciência e ensinamentos.

Por fim, mas nunca menos importante, agradeço a todos que de alguma forma fizeram parte da minha trajetória. Cada palavra de apoio, gesto de carinho e sorriso de incentivo me conduziram até aqui.

"Não quero ter a terrível limitação de quem vive apenas do que é passível de fazer sentido." (LISPECTOR, 1973).

RESUMO

A ausência de compatibilização entre projetos estruturais e complementares representa um dos desafios mais recorrentes na engenharia civil atualmente. Essa falta de integração leva, em muitos casos, à necessidade de ajustes durante a execução, como a inserção de aberturas em elementos estruturais de concreto armado para a passagem de tubulações, prática que pode resultar em alterações no comportamento estrutural das vigas e comprometer a segurança da estrutura. Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo desenvolver um algoritmo computacional capaz de automatizar o dimensionamento de reforços em vigas com aberturas na alma, visando agilizar e padronizar o processo. O algoritmo foi implementado na linguagem Visual Basic e teve sua validação conduzida por meio da modelagem de dez vigas com características distintas, as quais foram submetidas ao programa desenvolvido (AUREA) e a dois softwares comerciais, o Eberick® e o TQS®. Os resultados obtidos a partir da análise comparativa demonstraram similaridade entre as soluções do AUREA e as apresentadas pelos demais programas analisados, o que evidenciou sua eficácia no dimensionamento de reforços. Conclui-se que o algoritmo desenvolvido representa uma alternativa viável e promissora para a automação do dimensionamento de reforços em vigas de concreto armado com aberturas na alma. Embora ainda necessite de calibração, o programa alcança o objetivo deste trabalho ao reduzir o tempo de análise e mitigar possíveis erros humanos, contribuindo para a precisão de intervenções e segurança estrutural.

Palavras-chave: dimensionamento; vigas; aberturas; reforço; algoritmo.

ABSTRACT

The lack of compatibility between structural and complementary projects represents one of the most recurring challenges in civil engineering today. This lack of integration often leads to the need for adjustments during execution, such as the insertion of openings in reinforced concrete structural elements to allow the passage of pipes, a practice that can result in changes to the beam's structural behavior and compromise the safety of the structure. In this context, the objective of this study was to develop a computational algorithm capable of automating the design of reinforcements in beams with web openings, aiming to streamline and standardize the process. The algorithm was implemented in the Visual Basic programming language and its validation was carried out through the modeling of ten beams with distinct characteristics, which were analyzed using the developed program (AUREA) and two commercial software tools, Eberick® and TQS®. The results obtained from the comparative analysis showed similarity between the solutions generated by AUREA and those presented by the other analyzed software, demonstrating its effectiveness in reinforcement design. It is concluded that the developed algorithm represents a viable and promising alternative for the automation of reinforcement design in reinforced concrete beams with web openings. Although it still requires minor calibration, the program successfully achieves the objective of this study by reducing analysis time and minimizing potential human errors, contributing to greater accuracy in interventions and enhanced structural safety.

Keywords: design; beams; web openings; structural reinforcement; computational algorithm.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelos de abertura de alma em vigas de concreto armado em formato T.....	19
Figura 2 – Dimensões máximas de aberturas em vigas.	21
Figura 3 – Análise da região dos furos.....	21
Figura 4 – Esforços para dimensionamento das seções $S_1 - S_1$ e $S_2 - S_2$	22
Figura 5 – Detalhamento da armadura de reforço.....	23
Figura 6 - Abertura na alma de vigas.....	24
Figura 7 - Armadura de alma com abertura retangular.....	27
Figura 8 - Armadura adicional em vigas com aberturas circulares.....	28
Figura 9 - Flexão pura em Barras.....	29
Figura 10 – Esquema estrutural da viga com carregamento e os diagramas de solicitações.....	30
Figura 11 – Seção transversal submetida à flexo-compressão normal.	31
Figura 12 – Seção transversal sob à flexo-compressão oblíqua.	32
Figura 13 - Fluxograma ilustrando as etapas do algoritmo computacional.....	35
Figura 14 – Tela inicial do AUREA.	40
Figura 15 – Interface do algoritmo caso tenha mais de uma abertura.	41
Figura 16 – Interface para aberturas circulares.....	42
Figura 17 – Interface para aberturas retangulares.	42
Figura 18- Mensagem de aviso quando o furo está a menos de 10 cm da face da viga.....	43
Figura 19 – Mensagem de aviso caso a viga não suporte o momento.....	43
Figura 20 – Mensagem caso a viga não necessite de reforço.....	44
Figura 21 – Mensagem caso a viga precise de reforço.....	44
Figura 22 – Tela final do AUREA.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros das vigas analisadas (V1 a V5).	37
Quadro 2 - Parâmetros das vigas analisadas (V6 a V10).	38
Quadro 3 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no software Eberick® (V1 a V5).	46
Quadro 4 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no software Eberick® (V6 a V10).	46
Quadro 5 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no software TQS® (V1 a V5).	47
Quadro 6 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no software TQS® (V6 a V10).	47
Quadro 7 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no AUREA (V1 a V5).	48
Quadro 8 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no AUREA (V6 a V10).	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIM	Building Information Modeling
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras
NIBS	National Institute of Building Sciences
MBT	Método de Bielas e Tirantes
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
LN	Linha Neutra

LISTA DE SÍMBOLOS

Dd	Resultante de compressão no concreto
Zd	Resultante de tração no concreto
Qd	Esforço cortante total
qd	Carregamento distribuído
Rc	Forças normais nos banzos
Vd	Força cortante de cálculo
Md	Momento fletor de cálculo
D	Força normal no banzo superior
Z	Força normal no banzo inferior
M	Momento fletor atuante
z	Distância entre os eixos dos banzos
Nd	Esforço normal de cálculo
e	Excentricidade
h	Altura
b	Base
d	Altura útil
As	Área de aço
fcd	Resistência de cálculo
fck	Resistência característica do concreto
fyd	Resistência de escoamento do aço
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
mm	Milímetro
m	Metro
kN	Quilonewton
kN.m	Quilonewton metro
MPa	Megapascal
Ø	Diâmetro
ξ	Raiz xi
f(ξ)	Função de ξ

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivos gerais.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
1.2	Justificativa.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Conflitos entre projetos e impactos estruturais	16
2.2	Crítérios para dispensa de reforço	17
2.3	Comportamento de vigas com aberturas na alma.....	18
2.4	Métodos de dimensionamento de reforços.....	20
2.4.1	Abordagem de Sussekind (1987)	20
2.4.2	Método de Bielas e Tirantes.....	23
2.4.3	Contribuições de Araújo (2010a).....	24
2.4.4	Leonhardt e Mönnig (1978)	25
2.5	Tipos de Flexão	28
2.5.1	Flexão Pura	28
2.5.2	Flexão Simples	29
2.5.3	Flexão-Composta Normal.....	30
2.5.4	Flexão-Composta Oblíqua.....	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Levantamento teórico e normativo	33
3.2	Modelagem e implementação computacional.....	33
3.3	Validação do algoritmo	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	O algoritmo	39
4.2	Validação dos resultados	46
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

A crescente complexidade e inovações dos empreendimentos na engenharia civil vem intensificando os desafios relacionados a compatibilização entre projetos estruturais e demais complementares, como hidrossanitários, elétricos e de climatização. A ausência de integração entre os projetos dessas disciplinas ocasiona a necessidade frequente de interferências físicas durante a execução, exigindo adaptações e intervenções em elementos estruturais previamente dimensionados, como vigas e lajes de concreto armado.

Embora a disseminação de metodologias BIM (*Building Information Modeling*) tenha contribuído para o aumento significativo de identificações prévias de atritos entre projetos, apenas a detecção dessas interferências não soluciona os conflitos construtivos. Visto que, a resolução técnica adequada de tais situações requer soluções que considerem não somente as alterações do comportamento estrutural, mas também os critérios normativos vigentes, os métodos técnicos apropriados e a executabilidade das soluções propostas.

Nesse contexto, é notável a problemática da introdução de aberturas em vigas, prática comumente adotada para viabilizar a passagem de tubulações, apesar de afetar significativamente o fluxo de tensões internas, como enfatizado por Leonhardt e Mönning (1978), podendo comprometer sua estabilidade e durabilidade, caso não sejam tratadas de forma adequada. A norma brasileira ABNT NBR 6118:2023 recomenda, para essas situações, o emprego do Modelo de Bielas e Tirantes, abordagem consagrada no meio acadêmico.

Entretanto, a aplicação prática desse modelo, especialmente no contexto de intervenções emergenciais ou ajustes em fase de execução, acaba não sendo possível devido à laboriosidade do processo, que demanda certa experiência e sofre com a ausência de ferramentas automatizadas que sistematizem e agilizem a etapa de verificação e dimensionamento.

Diante disso, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver, implementar e validar um algoritmo computacional de automação do dimensionamento de reforços em vigas de concreto armado com aberturas na alma. A ferramenta será fundamentada nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023 e em modelos consagrados na literatura técnica, buscando integrar fundamentos teóricos e

normativos em um algoritmo que visa ampliar a confiabilidade, a agilidade e a acessibilidade do processo de análise e reforço desses elementos estruturais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Desenvolver, implementar e validar um algoritmo computacional para o dimensionamento automatizado de reforços em vigas de concreto armado com aberturas na alma, fundamentado nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023, visando integrar conceitos teóricos e práticos da engenharia estrutural em uma ferramenta que otimize e padronize o processo de dimensionamento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica acerca dos impactos das aberturas em vigas de concreto armado e os métodos de reforço recomendados na literatura técnica e normativa.
- Modelar e programar um algoritmo computacional capaz de identificar a necessidade de reforço e dimensionar as armaduras adicionais, conforme fundamentação teórica e critérios normativos adotados.
- Validar o algoritmo desenvolvido por meio de análises comparativas com softwares comerciais amplamente utilizados em âmbito nacional.

1.2 Justificativa

Uma das principais dificuldades enfrentadas durante a etapa de execução na construção civil é a incompatibilidade entre os diversos projetos que compõem um empreendimento. Esse cenário se dá, em grande parte, por conta da elaboração isolada dos projetos, como o arquitetônico, o estrutural e os complementares, sem que haja uma integração efetiva entre as disciplinas envolvidas.

Este fato resulta, em muitos casos, na adoção de intervenções em elementos estruturais para possibilitar a passagem de tubulações hidráulicas, elétricas e de

climatização. Entre essas intervenções, destacam-se as aberturas em vigas de concreto armado, prática que, se não prevista em projeto ou corretamente empregada, pode comprometer a segurança estrutural da edificação, além de ocasionar retrabalhos, atrasos e aumento nos custos da obra.

Nesse contexto, o dimensionamento adequado de reforços mostra-se indispensável para assegurar a integridade da estrutura e a conformidade com as normas técnicas vigentes. No entanto, o processo manual de verificação e dimensionamento desses casos é, em geral, moroso, suscetível a erros e dependente da experiência do projetista, o que pode ocasionar soluções excessivamente conservadoras ou subdimensionadas. Diante disso, a automatização dessa etapa torna-se uma alternativa promissora, capaz de proporcionar maior confiabilidade, padronização dos procedimentos e redução no tempo de resposta em situações que demandam resoluções ágeis.

A ABNT NBR 6118:2023, principal norma brasileira para projetos de estruturas de concreto armado, classifica regiões com aberturas como zonas de descontinuidade, e orienta o uso de abordagens específicas, como o Modelo de Bielas e Tirantes, que, embora consolidado teoricamente, ainda necessita de ferramentas automatizadas para sua aplicação de maneira acessível e sistematizada.

Diante do exposto, este trabalho justifica-se pela necessidade de desenvolver uma ferramenta computacional que integre fundamentos teóricos, critérios normativos e métodos de dimensionamento consagrados, com o objetivo de automatizar o cálculo de reforços em vigas com aberturas na alma. Desta forma, pode-se oferecer uma solução técnica, normativamente embasada e ágil, capaz de contribuir tanto para a prática profissional quanto como recurso didático no meio acadêmico.

Ao otimizar processos, reduzir a ocorrência de erros e retrabalhos e auxiliar na prevenção de patologias estruturais, o algoritmo proposto poderá impactar positivamente a qualidade dos projetos, a segurança das estruturas e a eficiência econômica na construção civil, alinhando-se as demandas atuais por soluções integradas e tecnológicas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A crescente demanda por soluções ágeis e confiáveis para conflitos entre projetos estruturais e complementares evidencia a necessidade de domínio sobre ferramentas e métodos atualizados, capazes de garantir intervenções eficientes e seguras. Portanto, faz-se fundamental a compreensão não apenas dos desafios práticos acerca da compatibilização de projetos, mas também as implicações estruturais decorrentes da execução de aberturas em vigas de concreto armado e os métodos de análise e dimensionamento de reforços presentes na literatura técnica.

Deste modo, o presente capítulo reúne o embasamento teórico indispensável para o desenvolvimento do algoritmo computacional proposto, abordando desde a origem dos desafios práticos da compatibilização e seus impactos na estrutura, até os principais métodos de cálculo de reforço de vigas com aberturas, tendo por objetivo proporcionar uma visão abrangente dos conceitos em que se baseiam a solução adotada neste trabalho.

2.1 Conflitos entre projetos e impactos estruturais

A falta de compatibilidade pode acarretar conflitos que, além de atrasos e retrabalhos, comprometem a segurança e a durabilidade das estruturas. Um exemplo disso é a necessidade de passagem de tubulações hidrossanitárias, elétricas e de climatização por elementos estruturais, como vigas e lajes, quando não previstas previamente.

Segundo Gomes e Almeida (2021), a análise dos projetos durante a execução não substitui a compatibilização prévia, sendo esta etapa primordial para mitigar inconformidades e assegurar eficiência na obra. A solução comumente adotada é a perfuração de elementos estruturais já executados sem o devido estudo, o que em alguns casos interfere significativamente a capacidade resistente desses elementos e pode por vezes comprometer a estrutura como um todo.

A implementação do BIM segue sendo uma das alternativas mais assertivas para solucionar os problemas resultantes da falta de compatibilização. Sendo o *Building Information Modeling* ou Modelagem de Informação da Construção (BIM), segundo o *National Institute of Building Sciences* (NIBS), instituto que apresentou uma das primeiras e amplamente utilizadas definições acerca do tema, uma representação digital das características físicas e funcionais de uma instalação, funcionando como

uma base de dados compartilhados que sustenta a tomada de decisões durante o ciclo de vida do empreendimento (NIBS, 2007, p. 21, tradução própria).

Segundo Paula *et al.* (2017), o BIM permite que a verificação seja feita no lançamento de todas as disciplinas, resultando em um maior controle de erros que poderiam ocasionar o atraso da obra, desperdícios de materiais e o surgimento de patologias estruturais.

2.2 Critérios para dispensa de reforço

A ABNT NBR 6118:2023 estabelece que a inserção de aberturas que atravessem vigas na direção de sua largura pode ocorrer sem a necessidade de reforços estruturais, desde que sejam atendidos alguns critérios para a posição e seção da abertura. Tais critérios visam garantir que a resistência do elemento não seja comprometida de maneira significativa, pois têm a finalidade de assegurar que a nova seção, após descontada a área da abertura, permaneça capaz de resistir aos esforços previstos no cálculo estrutural. Preservando, assim, a segurança e o desempenho do elemento, mesmo com a presença da descontinuidade.

Para que a dispensa seja verificada, a norma exige que as aberturas sejam posicionadas na região tracionada do elemento e que respeitem uma distância mínima de duas vezes a altura total da viga, contada a partir da face do apoio, evitando assim interferências nas zonas de maior concentração de esforços cortantes e de ancoragem. Além disso, a dimensão do furo deve ser limitada a, no máximo, 12 cm ou a um terço da altura da viga, devendo-se adotar sempre o menor valor. A norma também estabelece que furos consecutivos, quando posicionados no mesmo tramo, devem respeitar uma distância entre faces de, pelo menos, duas vezes a altura da viga. Por fim, fica estabelecido a necessidade de atender integralmente os cobrimentos mínimos e evitar o seccionamento das armaduras, sejam elas longitudinais ou transversais.

Caso todos os requisitos sejam respeitados simultaneamente, conclui-se que a presença do furo não resulta em uma redução significativa na capacidade resistente da viga, sendo possível então, a dispensa da obrigatoriedade do dimensionamento e execução de reforços.

2.3 Comportamento de vigas com aberturas na alma

A ABNT NBR 6118:2023 define como vigas os “elementos lineares em que a flexão é preponderante” (ABNT, 2023), sendo projetadas para resistir também a esforços de força cortante e, em alguns casos específicos, torção. A perfuração de aberturas nessas vigas, seja para passagem de tubulações ou demais fins, altera significativamente o comportamento estrutural do elemento. Conforme apresentado por Leonhardt e Mönning (1978), as aberturas reduzem significativamente a rigidez da viga e acabam por comprometer sua capacidade de resistir aos esforços, especialmente quando localizadas em regiões de maiores tensões.

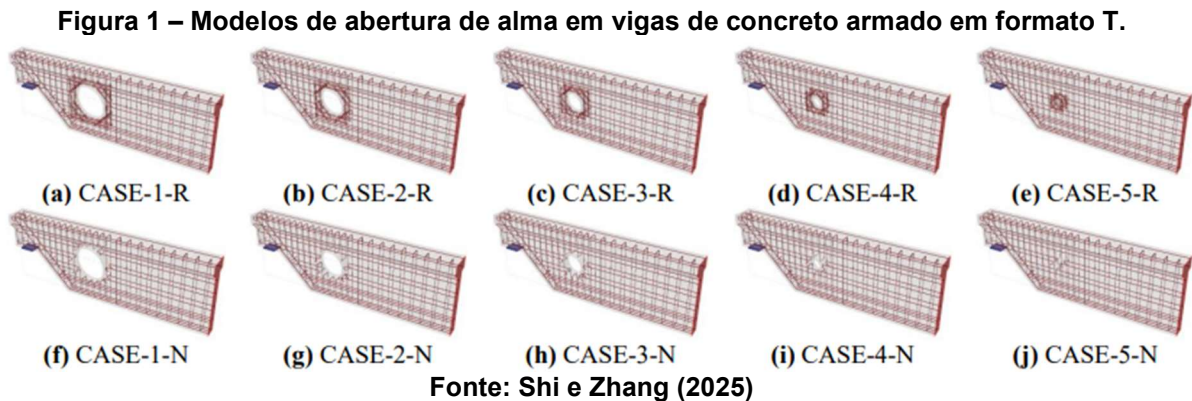
A ABNT NBR 6118:2023 classifica as regiões com aberturas como zonas especiais, exigindo análise diferenciada e determinadas verificações, que, se não atendidas, devem ser seguidas da adoção de métodos específicos para o dimensionamento, como o Modelo de Bielas e Tirantes que é o recomendado pela norma. A norma estabelece também limites para as dimensões das aberturas e recomenda que sua posição seja prevista em projeto para maior facilidade do dimensionamento.

Leonhardt e Mönning (1978) destacam que o posicionamento das aberturas é fator crítico para a segurança da viga, podendo reduzir sua capacidade de carga ou induzir colapsos prematuros. Aberturas posicionadas próximas aos apoios ou em regiões de cortante máxima são significativamente mais críticas, pois podem gerar fragilidades locais e comprometer a integridade geral da estrutura.

Estudos experimentais realizados por Shi e Zhang (2025), que analisaram a influência de aberturas variadas, representadas na Figura 1, no desempenho estrutural de vigas de concreto armado, confirmam que a presença de aberturas reduz a área resistente da viga e, em alguns casos, quando as aberturas apresentam geometrias menores, geram concentrações de tensão, o que culmina em falhas pontuais. O estudo apresentado pelos autores indica também que a aplicação de reforços otimiza a distribuição de carga, melhora a ductilidade e a resistência ao cisalhamento, além de atrasar o surgimento de trincas.

Conforme ilustrado na Figura 1, os exemplares do estudo foram modelados, no software IDEA StatiCa, e divididos em dois grupos: CASE-R, os quais possuem

reforço estrutural e CASE-N, os que não possuem. Ambos os grupos apresentando cinco variações de diâmetro de abertura, respectivamente, iniciando em 1000 mm e reduzindo progressivamente para 800 mm, 600 mm, 400 mm até, por fim, atingir 200 mm, posicionadas a 2,5 m do apoio.



Os exemplares consistem em vigas T, com vão total de 6 m, biapoiadas, sendo o apoio fixo posicionado a 40 cm da extremidade. As vigas apresentam altura de 200 cm, mesa com largura de 60 cm, alma com espessura de 30 cm e cobrimento de 4 cm. O concreto utilizado foi o C30 e o aço CA-400. A armadura longitudinal combinou barras de $\varnothing 19,05$ mm e $\varnothing 15,87$ mm, com estribos de $\varnothing 9,52$ mm. As vigas foram submetidas a uma carga permanente de 12 kN e uma carga variável de 10 kN, valores definidos pelos autores exclusivamente para fins de análise comparativa. Segundo o modelo apresentado, as cargas aplicadas resultaram em esforços internos de aproximadamente 80 kN a 70 kN, respectivamente.

A análise dos resultados evidenciou que a inserção de aberturas muito grandes ou excessivamente pequenas prejudica o desempenho estrutural das vigas, seja pela interrupção do fluxo de tensões e conseqüente redução da capacidade resistente, seja pela concentração de tensões que induzem fissuração prematura no elemento. Em contrapartida, constatou-se que o reforço ao redor das aberturas gerou uma melhora significativa em relação as distribuições das tensões, reduzindo deformações e retardando o surgimento de fissuras, o que contribui para uma maior resistência e desempenho. Assim, o estudo concluiu que a eficiência estrutural das vigas com aberturas na alma depende diretamente do dimensionamento e adoção de reforços adequados para essas aberturas.

2.4 Métodos de dimensionamento de reforços

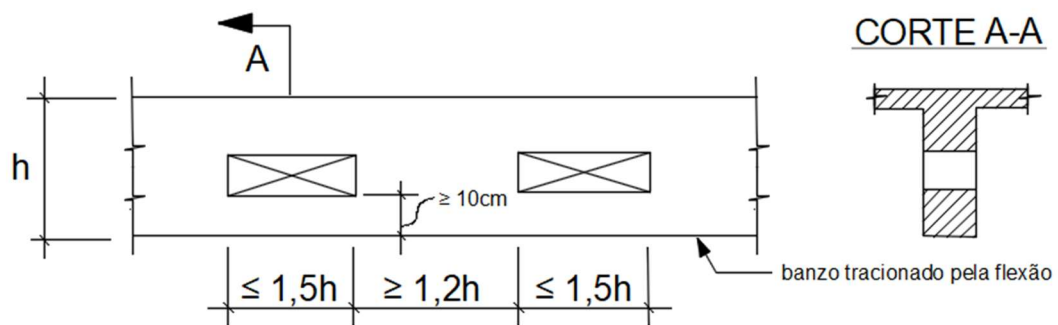
O dimensionamento de reforços em vigas com aberturas constitui uma área ainda pouco explorada e complexa da literatura técnica especializada. A introdução de descontinuidades, como furos ou aberturas em vigas, exige não apenas conhecimentos técnicos sobre os efeitos causados por essas intervenções, mas também domínio sobre os modelos aplicáveis ao seu dimensionamento, além de ampla expertise e conformidade acerca das normas vigentes. Os métodos adequados variam conforme a geometria da abertura, a intensidade dos esforços solicitantes e a posição do furo na viga.

2.4.1 Abordagem de Sussekind (1987)

Um dos marcos entre os métodos aplicáveis ao dimensionamento foi a abordagem proposta por Sussekind (1987), que propôs diretrizes baseadas em análises simplificadas do comportamento das seções perfuradas.

Sussekind (1987) propõe que, caso a abertura respeite determinados limites geométricos, apresentados na Figura 2, como altura da abertura inferior a 30% da altura total da viga, largura menor que 50% da largura da viga e distância entre aberturas igual ou superior a $1,2 h$ (sendo h a altura da viga), a influência da abertura perante a resistência da viga pode ser considerada desprezível. Nesses casos, o autor admite o comportamento do elemento como sendo o de uma viga maciça, podendo ser aplicados os métodos usuais para dimensionamento a flexão. Sussekind destaca também que a localização ideal do furo é próxima à região onde a força cortante é nula, desde que se garanta uma espessura suficiente para que o concreto não seja levado à ruptura pela flexão e seja assegurado um tirante mínimo de 10 cm para acomodar a armadura de flexão.

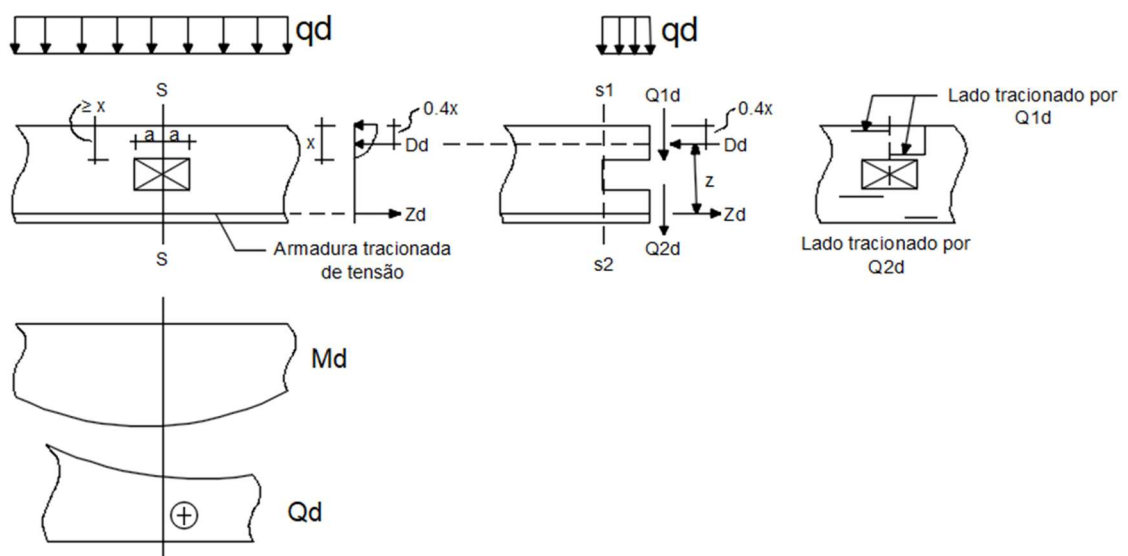
Figura 2 – Dimensões máximas de aberturas em vigas.



Fonte: Adaptado de Sussekind (1987)

Contudo, caso os limites sejam ultrapassados, o autor propõe um modelo de redistribuição de esforços bem intuitivo, interceptando a viga por um plano que corte o eixo do furo, obtendo o equilíbrio nessa seção. A partir disso, os esforços cortantes são redistribuídos, e a seção superior passa a resistir predominantemente a flexo-compressão, ao passo que a inferior é submetida a flexo-tração. A distribuição desses esforços pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Análise da região dos furos.

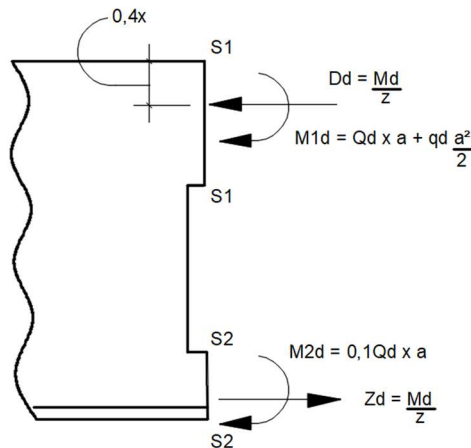


Fonte: Adaptado de Sussekind (1987)

O autor adota a distribuição convencional de momentos fletores por meio das resultantes de compressão no concreto (Dd) e tração na armadura (Zd), conforme

ilustrado nas Figuras 3 e 4. Paralelamente, o esforço cortante total, denominado Q_d , é redistribuído entre os banzos da viga, sendo o banzo superior o responsável por equilibrar a maior parte desse esforço ($Q_{1d} \approx Q_d$), ao passo que no banzo inferior assume-se $Q_{2d} \approx 0,1 \times Q_d$, visto que o esforço predominante é tração.

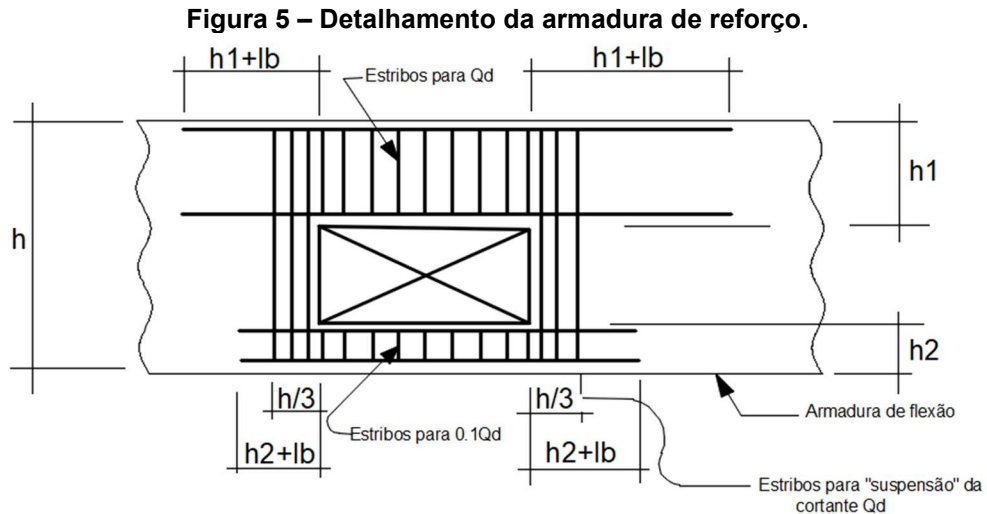
Figura 4 – Esforços para dimensionamento das seções $S_1 - S_1$ e $S_2 - S_2$



Fonte: Adaptado de Sussekind (1987)

Com base nessa análise, Sussekind (1987) considera a seção superior da viga ($S_1 - S_1$) como submetida à flexão composta normal (FCN), caracterizada pela atuação simultânea de um momento fletor (M_{1d}) e um esforço normal de compressão (D_d), desde que a flexão ocorra em um plano que contenha os eixos de simetria das seções transversais do elemento estrutural, conforme definido por Araújo (2010, p. 15).

Sussekind (1987) apresenta ainda o detalhamento que deve ser adotado para a armadura na região do furo, ilustrado na Figura 5, e ressalta que a adoção de armaduras simétricas é preferível a fim de evitar eventuais transtornos na etapa de execução.



Fonte: Adaptado de Sussekind (1987)

2.4.2 Método de Bielas e Tirantes

O Método de Bielas e Tirantes (MBT) é o modelo recomendado pela ABNT NBR 6118:2023 para a realização da análise e dimensionamento de regiões descontínuas em elementos de concreto armado. As regiões descontínuas são caracterizadas pela presença de descontinuidades geométricas ou de carregamento, como ocorre em zonas de ancoragem, apoios concentrados, mudanças bruscas de seção, ou ainda a presença de aberturas.

A ABNT NBR 6118:2023 define o MBT como um modelo que representa a distribuição interna de tensões por meio de bielas de concreto submetidos a compressão e tirantes de aço tracionado, interligados por nós que garantem o equilíbrio, de forma análoga a um sistema treliçado (ABNT, 2023).

Conforme a ABNT NBR 6118:2023, a aplicação do método exige, no mínimo, o cumprimento das seguintes etapas:

- 1) Identificação dos fluxos de esforços;
- 2) Definição da geometria da treliça equivalente;
- 3) Cálculo dos esforços atuantes em cada componente do modelo;
- 4) Verificação da resistência das bielas de concreto;
- 5) Verificação da resistência dos tirantes;
- 6) Verificação das condições de ancoragem, detalhamento e confinamento nos nós.

No caso de dimensionamento de vigas com aberturas na alma, o Método de Bielas e Tirantes permite desviar os esforços, que tiveram seus caminhos diretamente

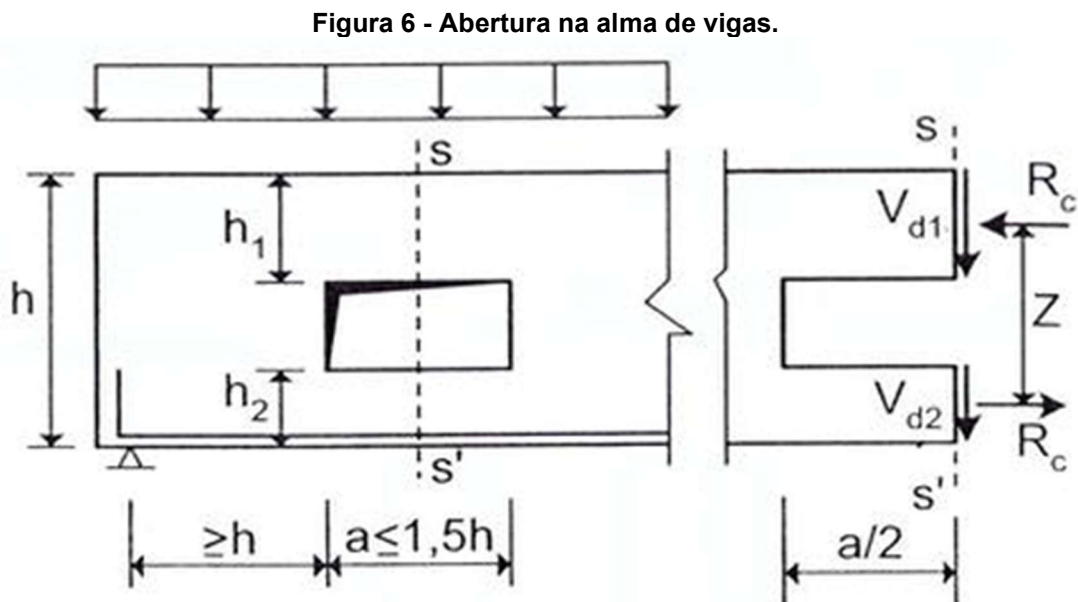
interrompidos devido a abertura, por trajetórias alternativas, redefinindo o fluxo de tensões e permitindo que a viga continue funcionando de maneira adequada.

Apesar das vantagens, o emprego do método apresenta limitações práticas, visto à subjetividade na definição da treliça equivalente, uma vez que diferentes profissionais podem propor geometrias distintas, resultando em trajetórias variadas e soluções de reforço igualmente divergentes.

2.4.3 Contribuições de Araújo (2010a)

Araújo (2010a) também tece comentários acerca das aberturas em vigas. O autor afirma que devem ser reforçadas por estribos e barras longitudinais que, a depender do tamanho e posição das aberturas, podem ser dispensados, visto a pouca influência na capacidade resistente da viga.

O autor supracitado sugere que o cálculo do reforço seja feito como apresentado na Figura 6. Nessa representação, a corresponde a largura da abertura, que deve ser menor ou igual a $1,5h$, sendo h a altura total da viga. As variáveis h_1 e h_2 indicam, respectivamente, as alturas do banzo superior e do banzo inferior da viga, delimitando a posição vertical da abertura.



Fonte: Araújo (2010a)

De acordo com Araújo (2010a), as forças normais de compressão e tração que atuam nos banzos, representadas por R_c , são separadas por uma distância vertical Z , e podem ser obtidas através da equação 1.

$$R_c = \frac{M_d}{Z} \quad (1)$$

Z representa a distância entre os eixos dos banzos, dada pela equação 2:

$$Z = h - \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) \quad (2)$$

Os esforços cortantes atuantes nos banzos são representados por V_{d1} (banzo superior) e V_{d2} (banzo inferior). O autor destaca que o banzo superior é o responsável por equilibrar a maior parte do esforço cortante. Portanto, a distribuição ocorre a modo que a V_{d1} fique responsável por 80% de V_d , sendo V_d a força cortante de cálculo, devendo ser maior ou igual a $0,8V_d$, e a V_{d2} assume a parcela restante de V_d .

Ambas as forças resultam em momentos fletores na extremidade da abertura, dados pela equação 3:

$$M_{d1} = V_{d1} \cdot \frac{a}{2} ; M_{d2} = V_{d2} \cdot \frac{a}{2} \quad (3)$$

Por fim, Araújo (2010a) indica que é necessário o dimensionamento de armaduras de suspensão capazes de resistir a força de $0,8V_d$ nas faces da abertura, a fim de garantir a integridade estrutural da região da abertura.

2.4.4 Leonhardt e Mönning (1978)

Os autores em sua obra “Construções de concreto: princípios básicos sobre armação de estruturas de concreto armado” (Leonhardt e Mönning, 1978), estabelecem critérios quanto aos limites e condições sob as quais as aberturas podem ser inseridas, sem que a segurança estrutural do elemento seja comprometida.

Na perspectiva de Leonhardt e Mönning (1978), a implementação de aberturas na alma de vigas é aceitável em trechos onde a força cortante permanece constante, desde que as bielas de compressão principais sejam mantidas. Os autores também admitem a inserção de aberturas em pórticos fechados que demonstrem níveis de

rigidez capazes de compensar a descontinuidade estabelecida pela aplicação da abertura.

Em regiões onde a força cortante é consideravelmente pequena, aberturas mais extensas podem ser adotadas, sem que o desempenho da viga seja comprometido. Nesses casos, o elemento estrutural passa a apresentar um comportamento semelhante a uma viga do tipo Vierendeel, sendo os esforços redistribuídos ao redor da abertura, o que demanda uma análise mais detalhada dos banzos superior e inferior, que passam a resistir a maior parte dos esforços aplicados.

Os autores destacam que é preferível a adoção de aberturas circulares as retangulares, por minimizarem as tensões concentradas nos vértices, e, quando adotadas aberturas retangulares, recomenda-se que os cantos devem ser os mais arredondados possíveis, pelo mesmo fator. Ademais, as aberturas que apresentem comprimento superior a 0,6 vezes a altura da viga ($0,6h$), precisam ser consideradas no cálculo estrutural, por interromperem as bielas de compressão principais, o que modifica de forma significativa o comportamento do elemento.

Leonhardt e Mönnig (1978) recomendam que o dimensionamento siga os seguintes critérios:

- 1) Dimensionamento à flexão, da seção m-m, assumindo seção cheia;
- 2) Forças normais nos banzos, calculadas com base na equação 4:

$$D = Z = \frac{M}{z} \quad (4)$$

onde:

D = força normal no banzo superior (submetida a compressão)

Z = força normal no banzo inferior (submetida a tração)

M = momento fletor atuante

z = distância entre os eixos dos banzos

- 3) Forças cortantes nos banzos, sendo a força cortante total (Q_m) redistribuída entre os banzos. A maior parcela fica a cargo do superior, sendo as forças calculadas através das equações 5 e 6:

$$Q_{sup} = (0,8 \text{ a } 0,9) \cdot Q_m \quad (5)$$

$$Q_{inf} = (0,1 \text{ a } 0,2) \cdot Q_m \quad (6)$$

4) Dimensionamento à flexão composta dos banzos, submetidos aos esforços obtidos através das equações 7 a 10:

$$M_{banzo \max}^{(sup)} = \pm Q^{(sup)} \cdot \frac{l'}{2} \quad (7)$$

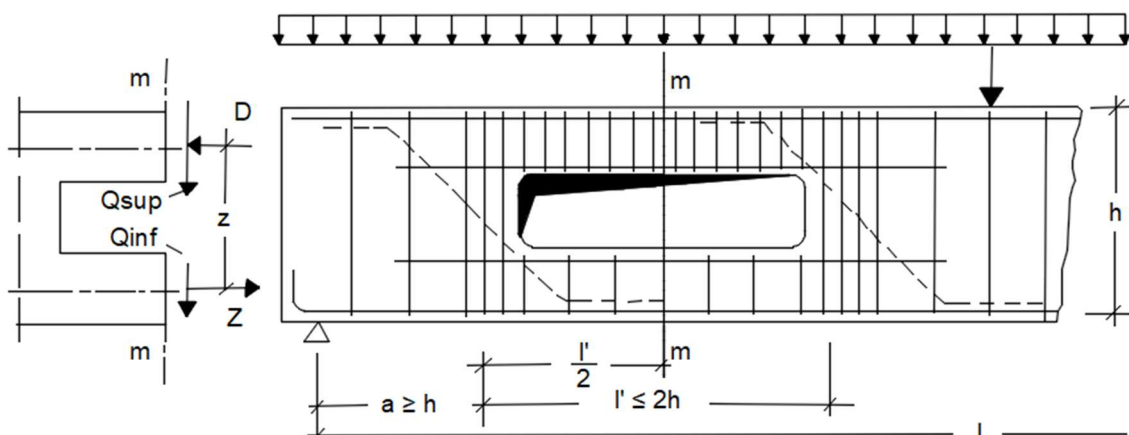
$$M_{banzo \max}^{(inf)} = \pm Q^{(inf)} \cdot \frac{l'}{2} \quad (8)$$

$$N^{(sup)} = D \quad (9)$$

$$N^{(inf)} = Z \quad (10)$$

- 5) Prever armadura de suspensão junto à abertura. Para o lado mais próximo ao apoio colocar de 1 a 3 estribos, já do lado mais afastado dimensionar para $0,8Q_m$.
- 6) Para vigas de grande porte, é necessária a disposição de barras inclinadas nos vértices das aberturas, conforme indicado pelas linhas tracejadas na Figura 7.

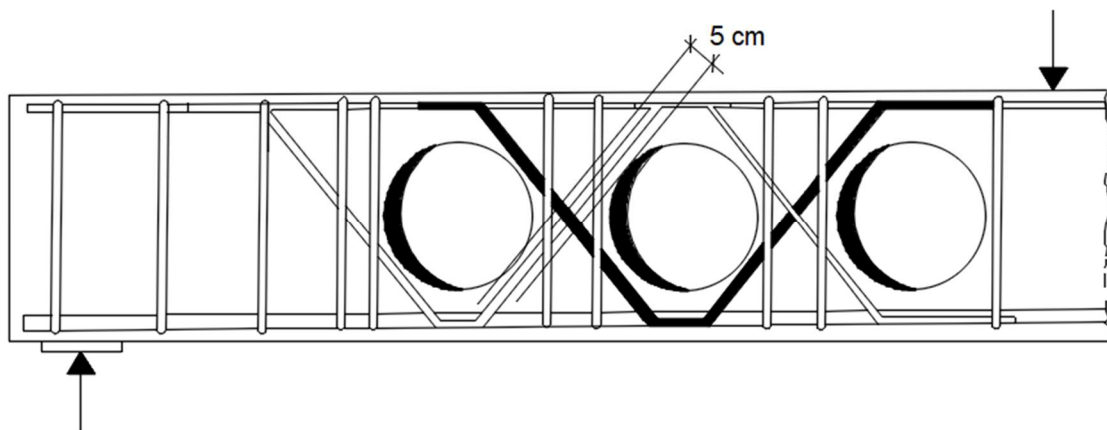
Figura 7 - Armadura de alma com abertura retangular.



Fonte: Adaptado de Leonhardt e Mönning (1978)

Em situações em que há necessidade de várias aberturas circulares em sequência, os autores recomendam que se mantenha uma distância entre elas que permita a formação de treliças internas, com diagonais tracionadas e comprimidas que se cruzem entre as aberturas. Nesses casos, é de grande valia o uso de barras em forma de V, como armadura adicional de cisalhamento, que podem ser dispostas como na Figura 8.

Figura 8 - Armadura adicional em vigas com aberturas circulares.



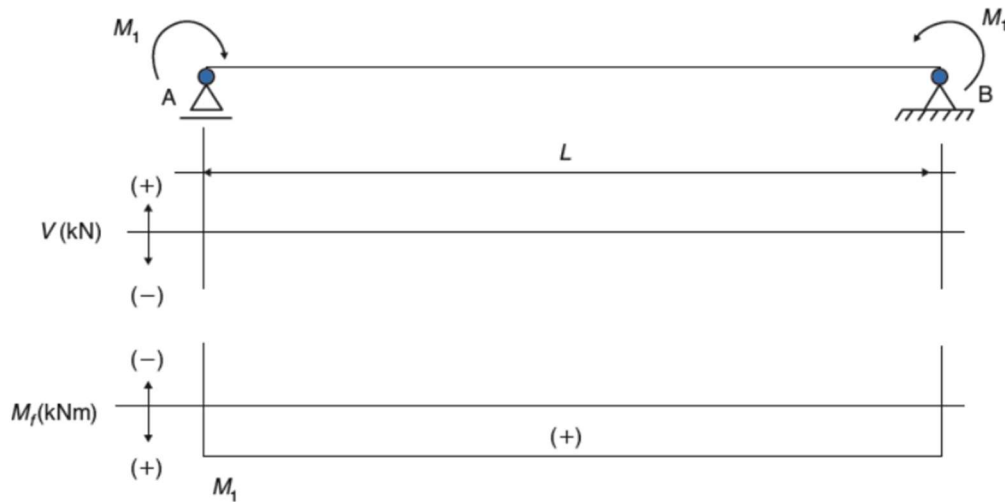
Fonte: Adaptado de Leonhardt e Mönning (1978)

2.5 Tipos de Flexão

2.5.1 Flexão Pura

A flexão pura ocorre quando um elemento estrutural se encontra submetido exclusivamente à ação de um momento fletor, não havendo a presença de esforço cortante (Pinheiro e Crivelaro, 2016), como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Flexão pura em Barras.



Fonte: Pinheiro e Crivelaro (2016)

De forma simplificada, Clímaco (2008) caracteriza a flexão pura como uma sollicitação em que a seção transversal do elemento é sollicitada apenas por tensões normais, originadas pela ação isolada do momento fletor (M).

Na prática, tal sollicitação é pouco observada em estruturas reais, uma vez que os elementos estruturais costumam estar submetidos a carregamentos que geram não somente momento fletor, como também esforços cortantes e, em alguns casos, forças axiais. Apesar disso, a flexão pura é de grande importância teórica e didática, por permitir a compreensão isolada dos efeitos do momento fletor sobre uma seção e servir como base para desenvolvimento de modelos simplificados para situações reais (Pinheiro e Crivelaro, 2016).

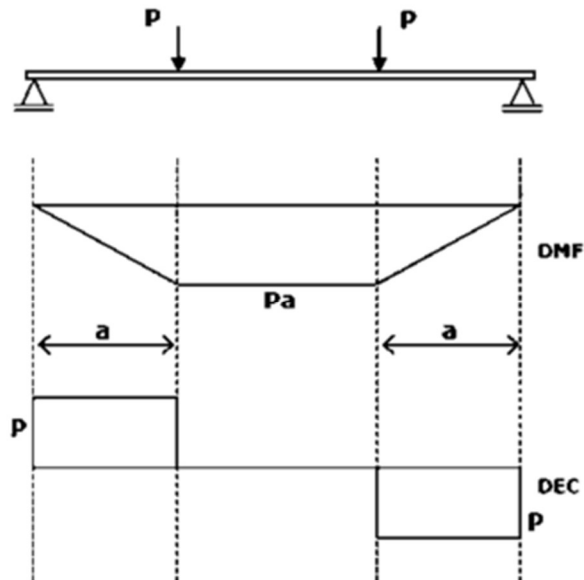
2.5.2 Flexão Simples

A flexão simples é a sollicitação mais comum quando se trata de elementos lineares, e se caracteriza pela atuação conjunta do “momento fletor e força cortante, produzindo tensões normais e tangenciais na seção” (Clímaco, 2008). Ou seja, o carregamento atua de maneira perpendicular ao eixo principal do elemento, gerando tanto momento quanto cisalhamento.

Esse tipo de sollicitação pode ser observado na Figura 10, especificamente nos trechos entre o ponto de aplicação da carga e o apoio, tanto esquerdo quanto direito, o que é denominado, por Clímaco (2008), como vão de cisalhamento ou vão

de corte. Já o trecho entre as cargas pontuais se caracteriza pela atuação de flexão pura.

Figura 10 – Esquema estrutural da viga com carregamento e os diagramas de solicitações.



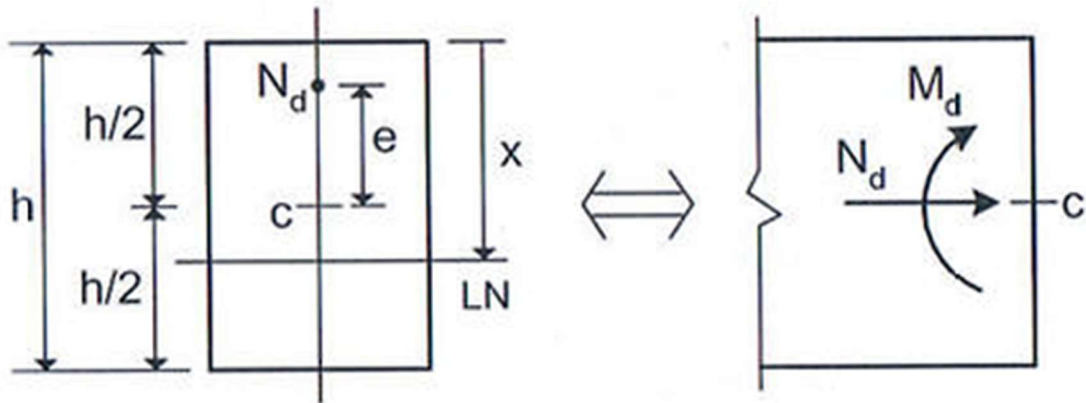
Fonte: Brixner (2017)

2.5.3 Flexão-Composta Normal

A flexo-compressão trata-se de “uma solicitação composta por um momento fletor e por um esforço normal de compressão” (Araújo, 2010b, p. 15). Denominando-se flexo-compressão normal quando ocorre em um plano que contém os eixos de simetria da seção transversal do elemento estrutural. Portanto, caracteriza-se a flexo-compressão normal pela atuação simultânea de um momento fletor e de um esforço axial de compressão ao longo de um plano coincidente com os eixos de simetria da seção transversal analisada.

Esse tipo de solicitação foi ilustrado na Figura 11, onde h é a altura da seção, c representa o centroide da seção, a força normal de compressão (N_d) está sendo aplicada no eixo de simetria da seção, a uma distância e do centroide.

Figura 11 – Seção transversal submetida à flexo-compressão normal.



Fonte: Araújo (2010b)

A solicitação gerada por uma força normal N_d quando aplicada com uma excentricidade e pode ser representada por um par de esforços equivalente: o esforço N_d e o momento fletor de cálculo, obtido através da relação $M_d = N_d \times e$.

A seção submetida à flexo-compressão normal exige a verificação simultânea da capacidade resiste à compressão e à flexão. Este processo, segundo Araújo (2010b), envolve as seguintes etapas:

- 1) Determinação do domínio de deformação;
- 2) Localização da linha neutra, que deve ser calculada de forma iterativa até o equilíbrio de forças internas e externas;
- 3) Verificação do equilíbrio estático;
- 4) Aplicação dos diagramas tensão-deformação;

O dimensionamento de seções sob flexo-compressão normal envolve a resolução do equilíbrio entre forças internas e externas, considerando a não linearidade do concreto e o comportamento elástico-plástico das armaduras de aço. Araújo (2010b) defende que o cálculo deve ser conduzido por processos iterativos, ajustando-se as áreas de armadura até que sejam satisfeitas as condições de equilíbrio.

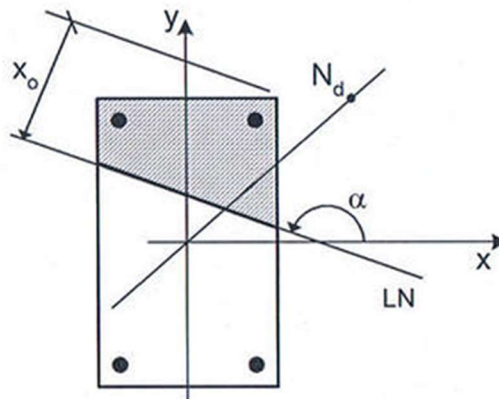
2.5.4 Flexão-Composta Oblíqua

Esse tipo de solicitação ocorre quando a força normal de compressão é aplicada fora dos eixos principais de simetria da seção transversal. Tal condição pode

ser verificada também em distribuições de armaduras não simétricas aos eixos, por alterar o comportamento resistente do elemento, mesmo que as cargas estejam atuando sobre um dos eixos de simetria da seção de concreto. Ademais, a flexão também se enquadra em oblíqua quando a seção em questão não possuir um eixo de simetria (Araújo, 2010b).

A flexo-compressão oblíqua foi representada por Araújo (2010b), podendo ser observada na Figura 12, onde N_d é a força normal, LN representa a linha neutra e x_0 a profundidade da linha neutra e α sua inclinação.

Figura 12 – Seção transversal sob à flexo-compressão oblíqua.



Fonte: Araújo (2010b)

O autor salienta ainda que, como a orientação da linha neutra não é conhecida previamente, o dimensionamento só pode ser feito por meio de tentativas. Sendo os esforços atuantes, N_d , M_{xd} (momento fletor na direção x) e M_{yd} (momento fletor na direção y), fornecidos e tendo como incógnitas x_0 , α e A_s (área de aço).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho adotou uma abordagem aplicada e quantitativa, com o objetivo de desenvolver, implementar e validar um algoritmo computacional voltado ao dimensionamento automatizado de reforços em vigas de concreto com aberturas na alma. O desenvolvimento da ferramenta teve como base os critérios apresentados pela ABNT NBR 6118:2023 e os modelos analíticos validados pela literatura técnica, em especial o método simplificado proposto por Sussekind (1987) e as formulações adaptadas de Araújo (2010b).

3.1 Levantamento teórico e normativo

A etapa inicial da pesquisa consistiu em uma revisão bibliográfica e normativa aprofundada, que foi contemplada no capítulo anterior, com o intuito de compreender os impactos estruturais decorrentes da inserção de aberturas em vigas de concreto armado. A partir da conclusão da revisão teórica, optou-se por seguir com a metodologia de Sussekind (1987), integrado as expressões analíticas propostas por Araújo (2010b), que permitiram a substituição dos ábacos, utilizados por Sussekind, por equações matemáticas, a fim de facilitar sua implementação no código.

Essa integração metodológica possibilitou manter a lógica estrutural original, adaptando-a a um formato compatível com os requisitos de precisão, padronização e agilidade exigidos em uma ferramenta automatizada de cálculo.

3.2 Modelagem e implementação computacional

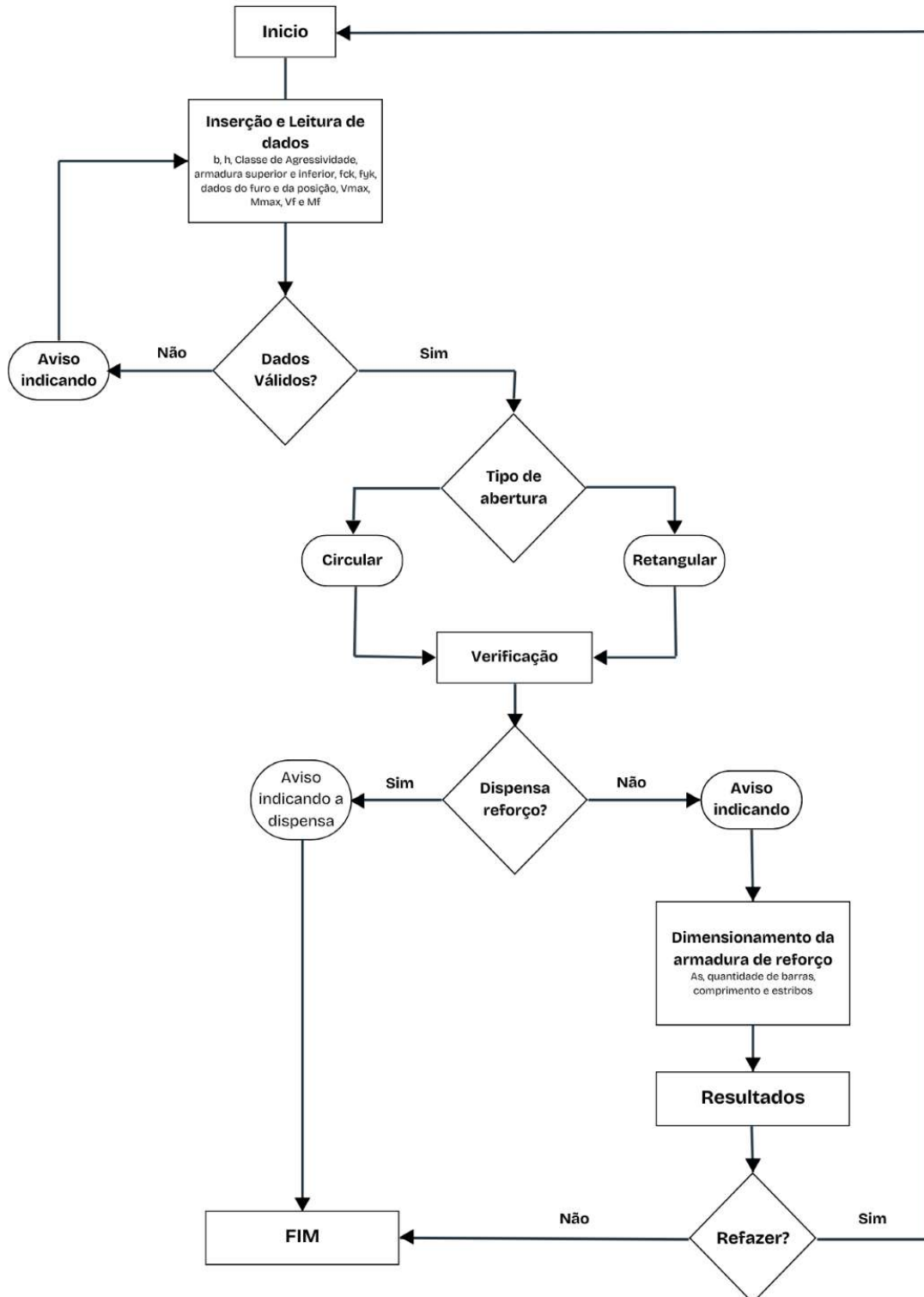
Com base nas metodologias e critérios definidos, iniciou-se o desenvolvimento do algoritmo. A estrutura do código foi organizada de modo a possibilitar a análise da necessidade de reforço em vigas com aberturas e, quando necessário, o dimensionamento automatizado das armaduras adicionais.

O algoritmo foi implementado utilizando a linguagem de programação Visual Basic, dentro do ambiente Microsoft Visual Studio Community 2022 (versão 17.9.5, 64 bits), escolhida por sua interface acessível e intuitiva. O código foi estruturado em módulos, sendo as principais etapas:

1. Entrada de dados pelo usuário;
2. Verificação automática dos critérios de dispensa para o reforço, de acordo com a ABNT NBR 6118:2023;
3. Avaliação dos esforços internos redistribuídos na presença da abertura;
4. Cálculo dos esforços atuantes nos banzos;
5. Dimensionamento das armaduras longitudinais e transversais do reforço;
6. Verificação de condições de ancoragem e espaçamento;
7. Apresentação dos resultados com o quantitativo de aço, bitolas sugeridas e esboço genérico do detalhamento.

O fluxograma que ilustra o funcionamento geral do algoritmo, busca representar de forma visual a sequência das operações internas do programa, está disposto na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma ilustrando as etapas do algoritmo computacional.



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3 Validação do algoritmo

A última etapa da metodologia correspondeu a validação do algoritmo desenvolvido, que se deu por meio de análise comparativa dos resultados obtidos no programa com aqueles gerados pelos softwares comerciais Eberick® e TQS®, amplamente utilizados por profissionais no Brasil.

Foram simuladas dez vigas com diferentes geometrias de aberturas, posicionamentos e combinações de carregamentos, sendo os mesmos dados de entrada replicados nos três sistemas analisados. As vigas tiveram suas seções, comprimentos e carregamentos definidos previamente e, posteriormente, foram modeladas no Eberick®, que foi o responsável pela determinação dos esforços solicitantes e das armaduras, que foram utilizados como base para o dimensionamento do reforço no TQS e no algoritmo proposto, o que possibilitou a comparação entre os programas.

A comparação teve como foco a análise da coerência dos resultados obtidos em termos de necessidade de reforço, quantidade e distribuição das armaduras longitudinais e transversais e conformidade com os critérios da ABNT NBR 6118:2023.

Durante o processo de validação, foram observadas e analisadas eventuais divergências entre os softwares comerciais e o algoritmo proposto, buscando identificar e pontuar possíveis causas.

As características das vigas analisadas como esforços solicitantes, dimensões da seção transversal, materiais utilizados, armaduras, posicionamento e dimensões das aberturas, estão apresentadas nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1 – Parâmetros das vigas analisadas (V1 a V5).

Parâmetros		Unidade	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5
Geometria da viga	Base (b)	cm	18	20	25	18	14
	Altura total (h)	cm	40	50	55	52	40
	Cobrimento (c)	cm	3	3	3	2,5	2,5
Materiais	fck (concreto)	MPa	25	30	35	25	25
	Aço	tipo	CA-50	CA-50	CA-50	CA-50	CA-50
Armaduras principais	Armadura superior (As')	cm ²	2 Ø10 (1,57 cm ²)	2 Ø10,0 (1,57 cm ²)	2 Ø12,5 (2,46 cm ²)	2 Ø10,0 (1,57cm ²)	2 Ø10,0 (1,57cm ²)
	Armadura inferior (As)	cm ²	3 Ø8,0 (1,51 cm ²)	2 Ø12,5 (2,46 cm ²)	2 Ø12,5 (2,46 cm ²)	2 Ø12,5 (2,46 cm ²)	2 Ø8,0 (1 cm ²)
Dados do furo	Tipo furo	-	Retangular - Horizontal	Circular - Horizontal	Retangular - Horizontal	Retangular - Horizontal	Circular - Horizontal
	Dimensões furo (b x h)	cm	8 x 8	20	20 x 25	20 x 18	13
	Posição furo (x / y)	cm	69,90 / 20	122,6 / 15	132,9/ 15	201,2/ 20	286/ 15
Esforços solicitantes	Vd,máx (força de cisalhamento)	kN	13,63	45,40	60,11	61,93	16,14
	Md,máx (momento fletor)	kN·m	6,18	34,90	38,68	48,08	15,26
	qd (carregamento)	kN	7,72	21,06	28,95	18,64	3,49
Esforços solicitantes	V no furo	kN	4,51	3,43	0,00	1,72	3,24
	M no furo	kN·m	5,31	34,82	38,68	48,01	14,19

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 2 - Parâmetros das vigas analisadas (V6 a V10).

Parâmetros		Unidade	Viga 6	Viga 7	Viga 8	Viga 9	Viga 10
Geometria da viga	Base (b)	cm	15	20	18	25	20
	Altura total (h)	cm	45	52	60	80	65
	Cobrimento (c)	cm	2,5	3	3	4	4
Materiais	fck (concreto)	MPa	25	35	35	45	45
	Aço	tipo	CA-50	CA-50	CA-50	CA-50	CA-50
Armaduras principais	Armadura superior (As')	cm ²	2 Ø10,0 (1,57cm ²)	2 Ø10,0 (1,57cm ²)	2 Ø10,0 (1,57cm ²)	4 Ø10,0 (3,14 cm ²)	2 Ø12,5 (2,46 cm ²)
	Armadura inferior (As)	cm ²	2 Ø10,0 (1,57 cm ²)	2 Ø10,0 (1,57 cm ²)	2 Ø12,5 (2,46 cm ²)	3 Ø12,5 (3,68 cm ²)	2 Ø12,5 (2,46 cm ²)
Dados do furo	Tipo furo	-	Retangular - Horizontal	Retangular - Horizontal	Retangular - Horizontal	Retangular - Horizontal	Circular - Horizontal
	Dimensões furo (b x h)	cm	10 × 15	14 × 12	15 × 20	16 × 23	8
	Posição furo (x / y)	cm	209,1/ 15	209,1/ 15	221,2/ 18	103,2/ 26	51,9/ 20
Esforços solicitantes	Vd,máx (força de cisalhamento)	kN	31,34	39,90	63,09	94,31	50,61
	Md,máx (momento fletor)	kN·m	23,25	31,17	52,48	91,88	61,02
	qd (carregamento)	kN	9,39	12,01	19,00	30,08	15,00
Esforços solicitantes	V no furo	kN	3,01	4,03	1,20	50,85	39,72
	M no furo	kN·m	22,91	30,70	52,41	59,04	4,41

Fonte: Autoria própria (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta como resultado o algoritmo AUREA – Algoritmo de Dimensionamento de Vigas com Aberturas na Alma, que foi desenvolvido a partir da metodologia e tecnologias supracitadas. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos a partir do algoritmo e dos demais softwares que foram submetidos a análise comparativa, o Eberick® e o TQS®, a fim de validar a eficácia do programa por meio de comparação das saídas dos programas para dez modelos de vigas distintas.

Com o intuito de padronizar os resultados e evitar configurações com grandes concentrações de área de aço, o algoritmo foi configurado para adotar, em todas as análises, duas barras longitudinais como armadura de reforço. Assim, o dimensionamento parte sempre deste arranjo base, ajustando apenas as bitolas necessárias de acordo com os esforços e critérios estabelecidos.

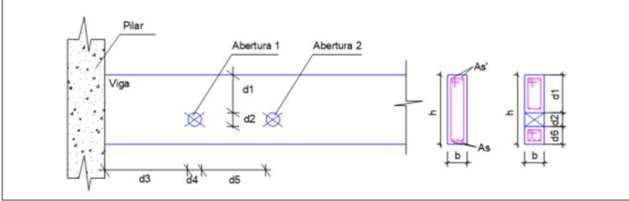
4.1 O algoritmo

A tela inicial do aplicativo (Figura 14) é a responsável pela coleta das informações necessárias para o dimensionamento do reforço, exibindo uma imagem de referência caso surjam dúvidas sobre alguma das dimensões solicitadas.

Figura 14 – Tela inicial do AUREA.

AUREA - Algoritmo de Reforço para Vigas com Aberturas na Alma

Calcular Reforço em Vigas com Aberturas



Mais de uma Abertura/Furo?
 Sim Não

Direção do Furo/Abertura
 Vertical (na altura da viga)
 Horizontal (na largura da viga)

Formato da Abertura
 Circular
 Retangular

Dados da Viga
 Base (b) = 20 (cm)
 Altura (h) = 60 (cm)
 Classe de Agressividade = 1

Armadura Superior (As')
 Bitola = 12 (mm)
 Barras = 2 (un)

Armadura Inferior (As)
 Bitola = 10 (mm)
 Barras = 2 (un)

Materiais
 fck = 25 (MPa)
 Aço = CA50

Esforços Solicitantes na Viga
 Vd,máx = 20 (kN)
 Md,máx = 16 (kN*m)
 qd = 12 (kN)

Esforços Solicitantes na Abertura
 V furo = 21 (kN)
 M furo = 15 (kN*m)

Dados da Abertura
 df = 15 (cm)
 d1 = 25 (cm)
 d3 = 40 (cm)

No caso de aberturas circulares o df é igual a d2 e d4

Calcular

Fonte: Autoria própria (2025)

Inicialmente o programa solicita os dados da viga, como a seção, caracterizada pela base (b) e altura (h), e a classe de agressividade (CA) do ambiente em que ela se encontra, sendo este último coletado através de uma *ListBox* que contém opções de CAA variando de 1 até 5.

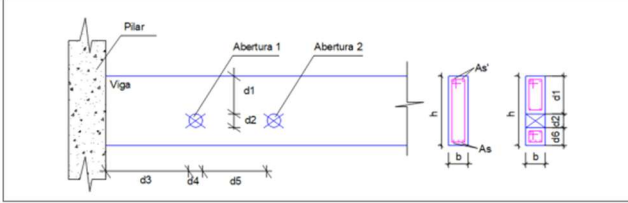
Em seguida, as entradas das armaduras existentes ocorrem, ficando a cargo do usuário inserir o número de barras e a bitola, tanto da armadura superior quanto da inferior. Sequencialmente, os dados dos materiais são definidos, sendo a resistência característica do concreto a ser utilizado (fck), informada em MPa, e o tipo de aço, que deve ser selecionado por meio de uma *ListBox* que oferece as opções CA-50 e CA-60.

Após isso, a entrada dos esforços solicitantes como esforço cortante máximo (Vd,máx) e no furo (Vf), momento fletor máximo (Md,máx), momento fletor na abertura (Mf) e o carregamento distribuído da viga (qd), é solicitada. Solicita-se ainda a quantidade de aberturas que serão inseridas, essa proporcionando uma alteração automática no layout da tela, tornando visível uma nova *TextBox*, direcionada a inserção da distância entre aberturas (d5). A Figura 15, disposta a seguir, apresenta a tela do AUREA nessa configuração.

Figura 15 – Interface do algoritmo caso tenha mais de uma abertura.

AUREA - Algoritmo de Reforço para Vigas com Aberturas na Alma

Calcular Reforço em Vigas com Aberturas



Mais de uma Abertura/Furo?
 Sim Não
 d5 = 30 (cm)

Direção do Furo/Abertura
 Vertical (na altura da viga)
 Horizontal (na largura da viga)

Formato da Abertura
 Circular
 Retangular

Dados da Abertura
 df = 15 (cm)
 d1 = 25 (cm)
 d3 = 40 (cm)

No caso de aberturas circulares o df é igual a d2 e d4

Dados da Viga
 Base (b) = 20 (cm)
 Altura (h) = 60 (cm)
 Classe de Agressividade = 1

Armadura Superior (As')
 Bitola = 12 (mm)
 Barras = 2 (un)

Armadura Inferior (As)
 Bitola = 10 (mm)
 Barras = 2 (un)

Materiais
 fck = 25 (MPa)
 Aço = CA50

Esforços Solicitantes na Viga
 Vd,máx = 20 (kN)
 Md,máx = 16 (kN*m)
 qd = 12 (kN)

Esforços Solicitantes na Abertura
 V furo = 21 (kN)
 M furo = 15 (kN*m)

Calcular

Fonte: Autoria própria (2025)

Posteriormente, o usuário deve selecionar a direção do furo (vertical ou horizontal) e a seção da abertura, tendo como opção aberturas circulares e retangulares. A seleção da seção modifica dinamicamente a interface do programa, exibindo campos específicos para cada escolha e alterando também a imagem de referência. A partir disso, são coletadas as medidas relacionadas a abertura, como o diâmetro do furo (df), para vigas circulares, ou sua largura (lf) e altura (hf), no caso de aberturas retangulares. Para ambas as escolhas são solicitadas a distância da face da abertura até a face superior da viga (d1) e a distância da face da abertura até o eixo do apoio mais próximo (d3). As Figuras 16 e 17 ilustram as telas do software quando selecionadas as opções de abertura circular e retangular, respectivamente.

Figura 16 – Interface para aberturas circulares.

AUREA - Algoritmo de Reforço para Vigas com Aberturas na Alma

Calcular Reforço em Vigas com Aberturas

Mais de uma Abertura/Furo?
 Sim Não

Direção do Furo/Abertura
 Vertical (na altura da viga)
 Horizontal (na largura da viga)

Formato da Abertura
 Circular
 Retangular

Dados da Abertura
 df = 15 (cm)
 d1 = 25 (cm)
 d3 = 40 (cm)

No caso de aberturas circulares o df é igual a d2 e d4

Dados da Viga
 Base (b) = 20 (cm)
 Altura (h) = 60 (cm)
 Classe de Agressividade = 1

Armadura Superior (As')
 Bitola = 12 (mm)
 Barras = 2 (un)

Armadura Inferior (As)
 Bitola = 10 (mm)
 Barras = 2 (un)

Materiais
 fck = 25 (MPa)
 Aço = CA50

Esforços Solicitantes na Viga
 Vd,máx = 20 (kN)
 Md,máx = 16 (kN*m)
 qd = 12 (kN)

Esforços Solicitantes na Abertura
 V furo = 21 (kN)
 M furo = 15 (kN*m)

Calcular

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 17 – Interface para aberturas retangulares.

AUREA - Algoritmo de Reforço para Vigas com Aberturas na Alma

Calcular Reforço em Vigas com Aberturas

Mais de uma Abertura/Furo?
 Sim Não

Direção do Furo/Abertura
 Vertical (na altura da viga)
 Horizontal (na largura da viga)

Formato da Abertura
 Circular
 Retangular

Dados da Abertura
 d2 = 15 (cm)
 d4 = 15 (cm)
 d1 = 25 (cm)
 d3 = 40 (cm)

No caso de aberturas circulares o df é igual a d2 e d4

Dados da Viga
 Base (b) = 20 (cm)
 Altura (h) = 60 (cm)
 Classe de Agressividade = 1

Armadura Superior (As')
 Bitola = 12 (mm)
 Barras = 2 (un)

Armadura Inferior (As)
 Bitola = 10 (mm)
 Barras = 2 (un)

Materiais
 fck = 25 (MPa)
 Aço = CA50

Esforços Solicitantes na Viga
 Vd,máx = 20 (kN)
 Md,máx = 16 (kN*m)
 qd = 12 (kN)

Esforços Solicitantes na Abertura
 V furo = 21 (kN)
 M furo = 15 (kN*m)

Calcular

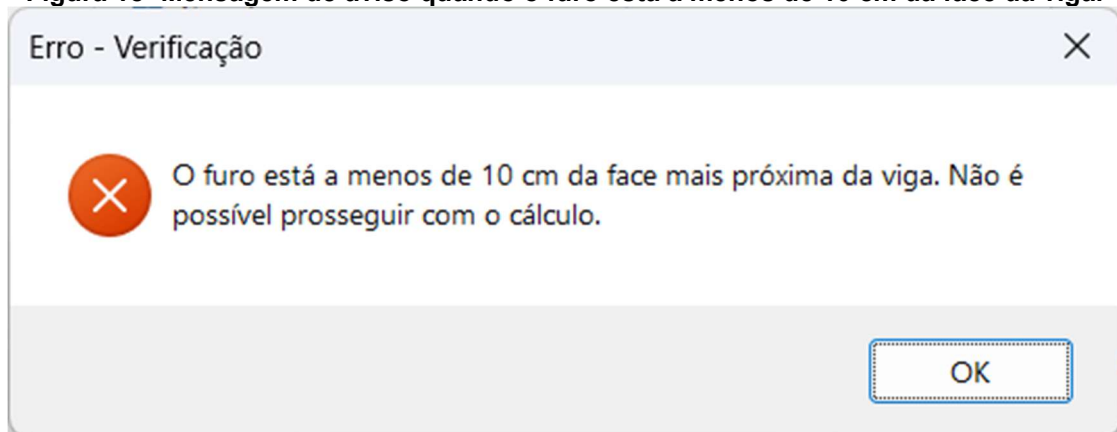
Fonte: Autoria própria (2025)

Vale ressaltar, que, caso algumas das *TextBox* detecte que um número não foi inserido, o programa interrompe a execução, direciona o foco para o campo onde

se encontra o problema e exibe uma mensagem solicitando que o usuário digite um número. Além disso, caso o usuário tenha inserido ponto ao invés de vírgula, o algoritmo corrige automaticamente assim que a tecla Enter é acionada.

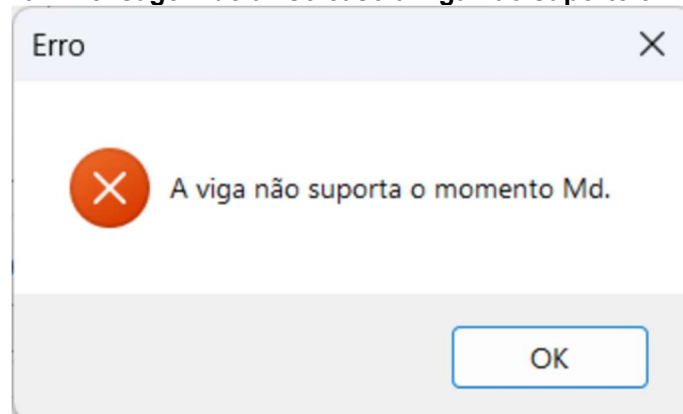
Após todas as informações preenchidas corretamente, o usuário deve clicar no botão “Calcular”. Na sequência a essa confirmação, o AUREA inicia o processo de dimensionamento, sendo o primeiro passo do programa a realização das verificações necessárias, e, caso alguns dos limites estabelecidos não sejam atendidos, o programa retorna mensagens de aviso específicas, de acordo com as inconsistências encontradas. Como, por exemplo, a mensagem da Figura 18, que é acionada quando o furo está localizado a menos de 10 cm da face da viga. Já a Figura 19 é apresentada caso seja verificado que a seção da viga após a inserção da abertura não é capaz de suportar o momento M_d .

Figura 18- Mensagem de aviso quando o furo está a menos de 10 cm da face da viga.



Fonte: Autoria própria (2025)

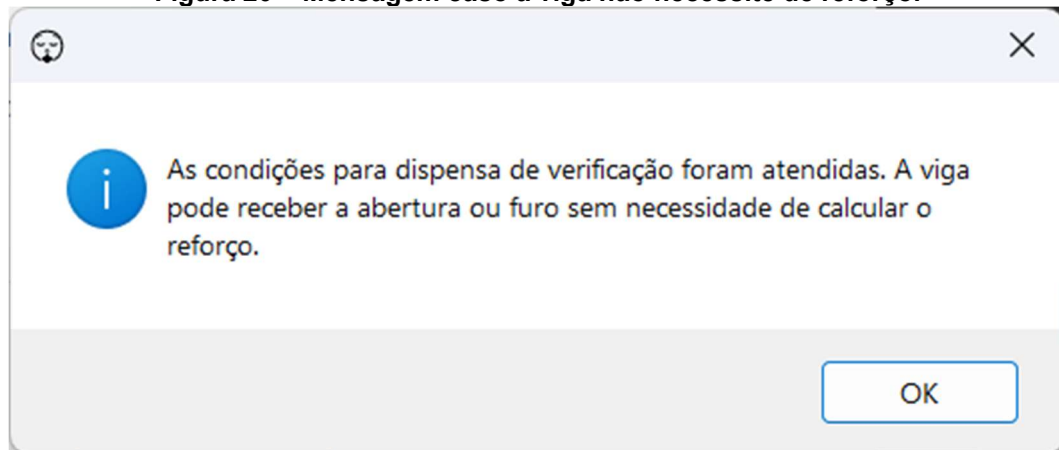
Figura 19 – Mensagem de aviso caso a viga não suporte o momento.



Fonte: Autoria própria (2025)

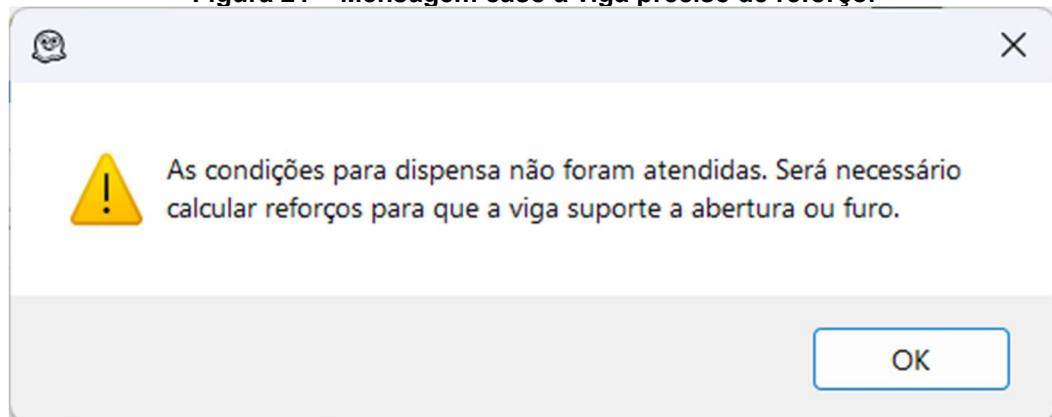
Caso a verificação não encontre nenhum limite que impeça a continuidade do dimensionamento, o AUREA apresenta duas mensagens possíveis. A primeira, caso tenha sido constatado que não há necessidade de dimensionar o reforço, pois a viga suporta os esforços mesmo com a inserção da abertura, mensagem apresentada na Figura 20, e a segunda quando é verificada a necessidade do dimensionamento (Figura 21).

Figura 20 – Mensagem caso a viga não necessite de reforço.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 21 – Mensagem caso a viga precise de reforço.



Fonte: Autoria própria (2025)

Além dos critérios normativos, o algoritmo incorporou alguns parâmetros adicionais de segurança, inspirados em práticas adotadas por softwares consagrados. Entre eles, destacam-se a adoção de uma distância mínima entre a abertura e as faces da viga, resultando em uma altura mínima de 10 cm para os banzos; a inserção de estribos adicionais que seguem para além da abertura, a uma distância de 1,5 vezes sua largura; o uso da maior força cortante atuante para o dimensionamento das

armaduras de reforços; e o limite mínimo dos espaçamentos dos estribos como sendo 5 cm.

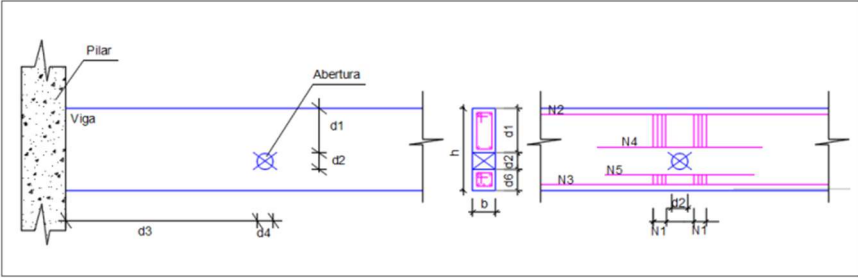
O processo iterativo de cálculo para o dimensionamento das armaduras de reforço foi realizado por meio do método da bissecante, utilizado para a determinação da raiz da função adimensional $f(\xi)$, garantindo maior precisão, conforme proposto por Araújo (2010). Após a obtenção do valor de ξ , o programa executa a função de dimensionamento, que calcula a taxa de armadura (ω) e a área total de aço (A_s). Em seguida, as funções responsáveis por definir o arranjo da armadura longitudinal e os estribos são acionadas, respectivamente.

Caso a dispensa não seja possível, após a exibição da mensagem de aviso apresentada na Figura 21, os resultados são então fornecidos ao usuário por meio de uma troca de *panel*, que exibe o detalhamento genérico da viga, um *label* com os resultados e um botão “Refazer”, que retorna ao *panel* inicial, permitindo a realização de novos cálculos. A interface final do programa, com a exibição dos resultados, pode ser observada na Figura 22.

Figura 22 – Tela final do AUREA.

AUREA - Algoritmo de Reforço para Vigas com Aberturas na Alma

Calcular Reforço em Vigas com Aberturas



Refazer

- ▶ Resultado da Armadura do banzo superior:
 - 2 barras de \varnothing 12,5 mm com comprimento total de 150 cm.
- ▶ Resultado da Armadura do Pilar Inferior:
 - 2 barras de \varnothing 10 mm com comprimento total de 123 cm.
- ▶ Estribos do Banzo Superior:
 - Usar 4 ramo(s) de \varnothing 5 mm com espaçamento de 12 cm.
- ▶ Estribos do Banzo Inferior:
 - Usar 4 ramo(s) de \varnothing 5 mm com espaçamento de 10 cm.
- ▶ Estribos N1, que devem ultrapassar 20 cm além da abertura, de ambos os lados:
 - Usar 2 ramo(s) de \varnothing 5 mm com espaçamento de 23 cm.

Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 Validação dos resultados

A validação do algoritmo se deu inicialmente pelas modelagens das vigas, apresentadas nos Quadros 1 e 2 da Metodologia, no software Eberick® e TQS®, e, posteriormente, no AUREA, algoritmo proposto neste trabalho. As vigas contemplaram uma gama considerável de configurações, com a base variando de 14 cm a 25 cm, a altura de 40 cm a 80 cm, o cobrimento de 2,5 cm até 4 cm e a resistência do concreto entre 25 MPa e 45 MPa.

Os resultados obtidos se encontram organizados nos Quadros 3 a 8.

Quadro 3 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no software Eberick® (V1 a V5).

Eberick®					
Parâmetros	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5
Armadura de Reforço Superior	2 Ø 6,3	2 Ø 10,0	2 Ø 12,5	2 Ø 10,0	2 Ø 8,0
Armadura de Reforço Inferior	3 Ø 6,3	2 Ø 10,0	2 Ø 12,5	2 Ø 12,5	2 Ø 8,0
Comprimento total superior (cm)	90	110	125	135	103
Comprimento total inferior (cm)	74	110	125	142	97
Estribos superiores	Ø5,0 c/9 (C=63)	2x4 Ø5,0 c/6 (C=45)	2x4 Ø5,0 c/6 (C=51)	3 Ø5,0 c/9 (C=67)	3 Ø5,0 c/6 (C=49)
Estribos inferiores	2x2 Ø5,0 c/4 (C=39)	2x4 Ø5,0 c/6 (C=45)	2x4 Ø5,0 c/6 (C=51)	2x4 Ø5,0 c/6 (C=47)	3 Ø5,0 c/5 (C=43)

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 4 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no software Eberick® (V6 a V10).

Eberick®					
Parâmetros	Viga 6	Viga 7	Viga 8	Viga 9	Viga 10
Armadura de Reforço Superior	2 Ø 8,0	2 Ø 8,0	2 Ø 10,0	2 Ø 10,0	3 Ø 6,3
Armadura de Reforço Inferior	2 Ø 10,0	2 Ø 8,0	2 Ø 12,5	2 Ø 12,5	3 Ø 8,0
Comprimento total superior (cm)	100	92	111	119	80
Comprimento total inferior (cm)	100	112	134	142	119
Estribos superiores	2 Ø5,0 c/6 (C=51)	2x3 Ø5,0 c/6 (C=47)	2 Ø5,0 c/8 (C=59)	4 Ø5,0 c/5 (C=81)	2 Ø5,0 c/5 (C=59)
Estribos inferiores	2 Ø5,0 c/6 (C=51)	2 Ø5,0 c/7 (C=77)	2 Ø5,0 c/8 (C=67)	4 Ø5,0 c/5 (C=91)	2 Ø5,0 c/6 (C=93)

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 5 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no software TQS® (V1 a V5).

TQS®					
Parâmetros	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5
Armadura de Reforço Superior	0,56 cm ²	0,56 cm ²	0,82 cm ²	0,56 cm ²	0,39 cm ²
Armadura de Reforço Inferior	0,41 cm ²	0,56 cm ²	0,64 cm ²	1,10 cm ²	0,32 cm ²
Comprimento total superior (cm)	-	-	-	-	-
Comprimento total inferior (cm)	-	-	-	-	-
Estribos superiores	1,85 cm ² /m	4,43 cm ² /m	5,60 cm ² /m	4,84 cm ² /m	1,44 cm ² /m
Estribos inferiores	1,85 cm ² /m	2,32 cm ² /m	3,21 cm ² /m	1,85 cm ² /m	1,44 cm ² /m
Estribos prolongados (N1)	0,32 cm ²	1,06 cm ²	1,41 cm ²	1,42 cm ²	0,37 cm ²

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 6 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no software TQS® (V6 a V10).

TQS®					
Parâmetros	Viga 6	Viga 7	Viga 8	Viga 9	Viga 10
Armadura de Reforço Superior	0,42 cm ²	0,56 cm ²	0,56 cm ²	0,93 cm ²	0,74 cm ²
Armadura de Reforço Inferior	0,42 cm ²	0,69 cm ²	0,62 cm ²	1,11 cm ²	1,27 cm ²
Comprimento total superior (cm)	-	-	-	-	-
Comprimento total inferior (cm)	-	-	-	-	-
Estribos superiores	3,16 cm ² /m	2,73 cm ² /m	5,24 cm ² /m	3,61 cm ² /m	3,04 cm ² /m
Estribos inferiores	1,54 cm ² /m	2,57 cm ² /m	2,31 cm ² /m	3,04 cm ² /m	3,04 cm ² /m
Estribos prolongados (N1)	0,73 cm ²	0,92 cm ²	1,45 cm ²	2,17 cm ²	1,16 cm ²

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 7 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no AUREA (V1 a V5).

Algoritmo proposto					
Parâmetros	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5
Armadura de Reforço Superior	2 Ø 8,0 (1,01 cm ²)	2 Ø 8,0 (1,01 cm ²)	2 Ø 8,0 (1,01 cm ²)	2 Ø 10,0 (1,57 cm ²)	2 Ø 6,3 (0,62 cm ²)
Armadura de Reforço Inferior	2 Ø 6,3 (0,62 cm ²)	2 Ø 8,0 (1,01 cm ²)	2 Ø 8,0 (1,01 cm ²)	2 Ø 8,0 (1,01 cm ²)	2 Ø 6,3 (0,62 cm ²)
Comprimento total superior (cm)	95	97	89	128	81
Comprimento total inferior (cm)	76	97	89	107	81
Estribos superiores	4 ramos de Ø 5,0 c/9	4 ramos de Ø 5,0 c/6	4 ramos de Ø 5,0 c/6	4 ramos de Ø 5,0 c/10	4 ramos de Ø 5,0 c/7
Estribos inferiores	Espaçamento inferior a 5 cm (inviável). Reforçar ou ampliar seção da viga.	4 ramos de Ø 5,0 c/6	4 ramos de Ø 5,0 c/6	4 ramos de Ø 5,0 c/6	4 ramos de Ø 5,0 c/5
Estribos prolongados (N1)	2 ramos de Ø 5,0 c/22	2 ramos de Ø 5,0 c/20	4 ramos de Ø 5,0 c/15	2 ramos de Ø 5,0 c/26	2 ramos de Ø 5,0 c/22

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 8 - Armaduras de reforço e estribos dimensionados no AUREA (V6 a V10).

Algoritmo proposto					
Parâmetros	Viga 6	Viga 7	Viga 8	Viga 9	Viga 10
Armadura de Reforço Superior	2 Ø 6,3 (0,62 cm ²)	2 Ø 8,0 (1,01 cm ²)	2 Ø 8,0 (1,01 cm ²)	2 Ø 12,5 (2,45 cm ²)	2 Ø 10,0 (1,57 cm ²)
Armadura de Reforço Inferior	2 Ø 6,3 (0,62 cm ²)	2 Ø 10,0 (1,57 cm ²)	2 Ø 10,0 (1,57 cm ²)	2 Ø 12,5 (2,45 cm ²)	2 Ø 12,5 (2,45 cm ²)
Comprimento total superior (cm)	78	83	84	107	81
Comprimento total inferior (cm)	78	100	101	107	99
Estribos superiores	4 ramos de Ø 5,0 c/7	4 ramos de Ø 5,0 c/6	4 ramos de Ø 5,0 c/8	4 ramos de Ø 5,0 c/12	4 ramos de Ø 5,0 c/9
Estribos inferiores	4 ramos de Ø 5,0 c/7	4 ramos de Ø 5,0 c/12	4 ramos de Ø 5,0 c/10	4 ramos de Ø 5,0 c/12	2 ramos de Ø 5,0 c/16
Estribos prolongados (N1)	2 ramos de Ø 5,0 c/25	2 ramos de Ø 5,0 c/18	2 ramos de Ø 5,0 c/20	4 ramos de Ø 5,0 c/12	2 ramos de Ø 5,0 c/16

Fonte: Autoria própria (2025)

A comparação das saídas evidenciou diferenças pontuais entre as soluções do AUREA e as dos demais softwares analisados. Observou-se que o TQS® apresenta os resultados por meio do valor mínimo da área de aço, enquanto o Eberick® e o AUREA entregam soluções com bitolas comerciais, fornecendo ao usuário o arranjo e a disposição final de armadura mais adequados.

As armaduras longitudinais de reforço propostas pelo algoritmo resultaram em áreas de aço levemente mais conservadoras que as propostas pelo TQS®, visto que o arredondamento para bitolas comerciais gera um pequeno excedente na área de aço quando comparada a taxa mínima.

De modo geral, os resultados demonstram que o AUREA apresentou valores consistentes de armadura longitudinal, por vezes ligeiramente menores, com variações limitadas a uma bitola comercial acima ou abaixo das soluções do Eberick®, demonstrando certa otimização de material sem comprometer a segurança, se mantendo normativamente consistente e com margem de segurança de acordo com os valores obtidos pelo TQS®.

No entanto, a Viga 4 destaca-se como um ponto de atenção, visto que, neste teste, o software desenvolvido apresentou uma área de aço de 1,01 cm², aproximadamente 8,18% menor que o valor de 1,10 cm² exibido pelo TQS®. Embora essa diferença não seja tão alarmante, ela demonstra uma necessidade de verificação mais aprofundada quanto à frequência e às possíveis causas para tal subdimensionamento. É possível que variações específicas nos momentos solicitantes ou condições de contorno tenham influenciado o resultado, uma vez que o TQS® adota métodos de cálculo e redistribuição de esforços mais refinados. Deste modo, recomenda-se uma lapidação da lógica de dimensionamento do algoritmo para garantir maior precisão em casos similares.

No que tange o cálculo das armaduras transversais, o AUREA demonstrou ser mais rigoroso que os demais. Enquanto o TQS® retorna a área de aço distribuída por metro linear e os valores dos estribos N1 (estribos que se estendem além da abertura), o AUREA não apenas calcula o N1, mas também fornece os arranjos adequados. Outro ponto de destaque do algoritmo desenvolvido foi a adoção de um limite de espaçamento de 5 cm para estribos, visando garantir uma execução correta e facilitada em campo, visto que espaçamentos menores que esse limite se tornam inviáveis do ponto de vista técnico.

Por fim, vale destacar outro aspecto. O software Eberick®, por mais que ofereça essa ferramenta, não executou o dimensionamento de vigas com aberturas verticais para nenhuma das seções e carregamentos testados, mesmo em configurações de seções mínimas uma mensagem de aviso sobre o Erro D16 era exibida. Erro este que é descrito pelo programa como um erro na armadura negativa, indicando que nenhuma bitola configurada poderia ser usada. Visto isso, e levando em consideração também que o TQS® não possui tal funcionalidade, nenhum caso com abertura vertical foi contemplado nessa análise comparativa, embora esse dimensionamento esteja implementado no AUREA.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento e a validação de um algoritmo computacional para o dimensionamento automatizado de reforços em vigas de concreto armado com aberturas na alma, fundamentado na ABNT NBR 6118:2023 e em referências técnicas consagradas na literatura acadêmica. A proposta buscou integrar o conhecimento normativo à aplicação prática de ferramentas computacionais, visando ampliar a agilidade, a precisão e a padronização no processo de verificação e dimensionamento de reforços em vigas com aberturas.

Os resultados obtidos demonstraram que o algoritmo desenvolvido (AUREA) apresentou comportamento coerente com os principais softwares comerciais em uso no cenário nacional, destacando-se pela capacidade de gerar soluções completas, com dimensionamentos detalhado das armaduras longitudinais e transversais. Para além disso, no entanto, ficou evidente que, apesar do software exibir resultados satisfatórios, ele ainda apresenta variações consideráveis entre alguns casos analisados, o que indica uma necessidade de calibração para uma maior consistência de resultados. Ademais, a metodologia e a integração dos métodos e equações adotadas ficam validadas por meio dos resultados.

A automatização do dimensionamento de reforços em vigas com aberturas se mostrou viável e promissora, visto que contribui para a redução do tempo de análise e a suscetibilidade a erros humanos, além de possibilitar respostas mais ágeis em situações que demandam intervenções urgentes. Destaca-se, portanto, a relevância prática desta pesquisa, uma vez que o uso de ferramentas como o AUREA pode auxiliar na tomada de decisões e contribuir para a melhoria da qualidade e da segurança das estruturas.

Como perspectivas futuras, recomenda-se o aprimoramento do algoritmo, com a incorporação de novas metodologias, como o Método de Bielas e Tirantes, recomendado pela ABNT NBR 6118:2023, bem como sua integração com plataformas BIM, visando possibilitar sua aplicação em ambientes tridimensionais.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado: Volume 2**. 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010a.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado: Volume 3**. 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- BRIXNER, D. **Análise Teórica e Experimental de Aberturas Horizontais em Vigas de Concreto Armado**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2017.
- CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto armado**: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação. Brasília: Editora Universidade de Brasília: Finatec, 2008.
- GOMES, N. L.; ALMEIDA, D. H. Impacto da ausência de compatibilização de projetos na execução de uma obra residencial. **Journal Of Engineering And Exact Sciences**, Viçosa, p. 1-9. mar. 2021.
- LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: princípios básicos sobre armação de estruturas de concreto armado (Volume 3)**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.
- LISPECTOR, C. **Água viva**. Rio de Janeiro: Rocco, 1973.
- NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. NBIS: National Bim Standard. Estados Unidos: National Building Information Modeling Standard, 2007.
- PAULA, H. M. *et al.* Mapeamento Sistemático de Referências do Uso do BIM na Compatibilização de Projetos na Construção Civil. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 13, n. 1, p. 219-239, mar. 2017.
- PINHEIRO, A. C. F. B.; CRIVELARO, M. **Fundamentos de Resistência dos Materiais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- SHI, Mo; ZHANG, Ji. Structural influences of various web opening designs on RC beams with the static analysis. **Insight - Civil Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 742-770, jun. 2025.
- SUSSEKIND, J. C. **Curso de Concreto: Volume 2**. 3. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.