

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Paula Lemes Diniz

**ESTUDO DE CASO: VIGA DE CONCRETO ARMADO COM FUROS
HORIZONTAIS TRANSVERSAIS**

Goiânia, GO
2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Paula Lemes Diniz

Matrícula: 20191011050160

Título do Trabalho: Estudo de caso: viga de concreto armado com furos horizontais transversais

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 08/02/2024
Local Data

Paula Lemes Diniz

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Paula Lemes Diniz

**ESTUDO DE CASO: VIGA DE CONCRETO ARMADO COM FUROS
HORIZONTAIS TRANSVERSAIS**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de
Engenharia Civil, do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Campus Goiânia, como parte dos
requisitos necessários para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Civil**

**Orientador: Prof. Me. Cláudio Marra
Alves**

**Coorientador: Eng.º Esp. Michel
Henrique da Silveira**

Goiânia, GO

2023

D585e Diniz, Paula Lemes.

Estudo de caso: viga de concreto armado com furos horizontais transversais / Paula Lemes Diniz. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2023. 109f.

Orientação: Prof. Me. Cláudio Marra Alves.

Coorientação: Eng.º Esp. Michel Henrique da Silveira.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.
Inclui anexo e apêndice.

1. Concreto armado. 2. Projeto estrutural. I. Alves, Cláudio Marra (orientação). II. Silveira, Michel Henrique da (coorientação). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 624.183 41

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

Paula Lemes Diniz

ESTUDO DE CASO: VIGA DE CONCRETO ARMADO COM FUROS HORIZONTAIS TRANSVERSAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Membros da banca: Me Cláudio Marra Alves (orientador), Esp. Michel Henrique da Silveira, Dr. Elias Calixto Carrijo e Dr. Paulo Francinete Silva Júnior.

Aprovado em 14 de Dezembro de 2023.

Documento assinado eletronicamente por:

- Paulo Francinete Silva Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/02/2024 12:35:03.
- Elias Calixto Carrijo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/02/2024 10:29:01.
- Claudio Marra Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 01/02/2024 16:21:33.
- Michel Henrique da Silveira, Michel Henrique da Silveira - 214205 - Engenheiro civil - Domo Engenharia S/S (06541272000185), em 17/01/2024 14:50:43.
- Matilde Batista Melo, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - GYN-CCBEC, em 16/12/2023 16:55:13.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 16/12/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 491606
Código de Autenticação: 2939d11631



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
(62) 3227-2736 (ramal: 2736)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço imensamente ao engenheiro especialista Michel Henrique da Silveira por disponibilizar os dados e os materiais do projeto estrutural em estudo e todo o seu conhecimento para auxílio na orientação com o trabalho e vida profissional.

Quero agradecer sinceramente à equipe TQS pela concessão da licença gratuita para utilizar seu programa, que foi um diferencial fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Assim como, agradeço ao suporte pela excelência e eficácia ao solucionar questionamentos, proporcionando um aprendizado valioso.

Agradeço a todos professores e colegas que contribuíram com minhas experiências e conhecimentos, enriquecendo o desenvolvimento deste trabalho e da minha vida profissional.

À minha família e aos meus amigos, que sempre me apoiaram incondicionalmente durante toda a jornada acadêmica e estiveram ao meu lado nos momentos desafiadores e compartilharam das alegrias.

EPIÍGRAFE

"사람 위에 사람 없고 사람 밑에 사람 없어."

"Não há ninguém acima de ninguém, e não há ninguém abaixo de ninguém."

"No one is above anyone else, and no one is below anyone else."

(Jung Hoseok – Equal Sign)

RESUMO

A inserção de furos horizontais em vigas de concreto armado é comumente realizada para passagem de tubulações de instalações hidráulicas, sanitárias, elétricas e telefônicas em construções em todo o mundo. Essas aberturas carecem de armaduras de reforço, devido as modificações que podem levá-las a atingir o estado limite último (ELU) e o estado limite de serviço (ELS). Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é a revisão bibliográfica de diferentes métodos para a adição de furos horizontais em vigas de concreto armado, com foco em dimensionamento e detalhamento de armadura de reforço de uma viga, por meio de cálculos manuais e com a utilização do programa de análise estrutural. Também são investigadas as etapas de integração do projeto de furação com o projeto estrutural em um escritório de projeto estrutural. O procedimento metodológico consiste no dimensionamento e detalhamento, utilizando o método Süsserkind, de uma viga de concreto armado projetada e que contém sete furações horizontais transversais. Assim, obtendo armações que suportaram os esforços aplicados nas seções das aberturas do elemento estrutural, tanto pelo método Süsserkind, quanto pelo programa TQS. A partir do estudo dessa viga, observou-se que o método utilizado, em geral, obteve áreas de aço maiores que as ferramentas auxiliares do programa de análise estrutural, sendo o valor mais alto de 88,97% de diferença para um dos furos analisados.

Palavras-chave: Furos. Aberturas. Vigas. Concreto armado.

ABSTRACT

The accommodation of horizontal web openings in reinforced concrete beams is commonly performed for passing of pipes and ducts for water supply, sewage, electrical and telephone installations in constructions around the world. These openings lack reinforcing reinforcement, due to modifications that can lead them to reach the ultimate limit state (ULS) and the serviceability limit state (SLS). Thus, the general objective of this work is the bibliographical review of different methods for adding horizontal holes in reinforced concrete beams, focusing on design and detailing of reinforced concrete beam's reinforcing reinforcement, through manual calculations and using of the structural analysis software. The stages of integration of the opening projects with the structural projects in a structural design office are also investigated. The methodological procedure consists of the dimensioning and detailing, using the Süsskind method, of a designed reinforced concrete beam that contains seven transverse horizontal holes. Thus, obtaining frames that withstood the efforts applied to the opening sections of the structural element, both using the Süsskind method and the TQS software. From the study of this beam, it was observed that the method used, in general, obtained larger steel areas than the auxiliary tools of the structural analysis software, with the highest value being 88.97% difference for one of the holes analyzed.

Keywords: Holes. Web openings. Beams. Reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema estrutural de uma garagem.	16
Figura 2 - Duto de serviço transversal em vigas de concreto armado.....	17
Figura 3 – Viga Vierendeel.....	18
Figura 4 – Ruptura por torção por flexão oblíqua.....	20
Figura 5 – Exemplo 1 de furação errada na viga.....	20
Figura 6 – Exemplo 2 de furação errada na viga.....	21
Figura 7 – Exemplo 3 de furação errada na viga.....	21
Figura 8 - Linha cronológica NBR 6118.	24
Figura 9 - Norma NB-1 1960.	26
Figura 10 – Dimensões limites para não verificação das aberturas conforme NB-1 1978.	27
Figura 11 - Capa da NBR 6118:1980.	28
Figura 12 – Dimensões limites para não verificação das aberturas conforme NBR 6118:2003.	30
Figura 13 – Dimensões limites para inserção de furos que atravessam as vigas.	32
Figura 14 – Vigas com aberturas na alma.....	34
Figura 15 – Viga com abertura extensa na alma.....	34
Figura 16 – Armadura de alma com abertura retangular.....	35
Figura 17 – Armadura adicional em vigas com aberturas circulares.	37
Figura 18 – Limites de furação transversal em vigas.	38
Figura 19 – Esforços calculados como viga maciça.....	39
Figura 20 – Interseção da viga por plano no eixo do furo.	40
Figura 21 – Fibras tracionadas por Q_{1d} e Q_{2d} (supostos positivos).	41
Figura 22 – Esforços para dimensionamento das seções S_1-S_1 e S_2-S_2	41
Figura 23 – Detalhamento da armadura de reforço do furo.....	42
Figura 24 – Apresentação das inclinações das bielas de concreto.	43

Figura 25 – Apresentação do estribo não colaborante.....	44
Figura 26 – Aberturas múltiplas na viga.	44
Figura 27 – Pequenas aberturas que não prejudicam a resistência da viga.	45
Figura 28 – Pequenas aberturas que prejudicam a resistência da viga.	45
Figura 29 – Critérios para dimensionamentos de grandes aberturas.....	46
Figura 30 – Situações duvidosas que devem ser tratadas como se fossem grandes aberturas.	47
Figura 31 – Fissuração das partes consideradas como não resistentes.....	47
Figura 32 – Abertura na alma da viga.	48
Figura 33 – Reforço nas aberturas da viga.	49
Figura 34 – Espiral de projeto geral.	51
Figura 35 – Recomendação da apresentação da furação.....	55
Figura 36 – Visualização 3D da compatibilização projetos estrutural e de furação...55	
Figura 37 - Fluxograma métodos de abordagem de pesquisa científica.	59
Figura 38 – Projeto de furação com ênfase na viga estudada.	62
Figura 39 – Viga V22 via TQS.....	64
Figura 40 – Planta de formas com alteração.....	65
Figura 41 – Detalhes furação projeto markup.	66
Figura 42 – Representação das cargas e diagrama de momento fletor (tf.m).	67
Figura 43 – Representação das cargas e diagrama de esforço cortante (tf).....	68
Figura 44 – Vão efetivo da viga.....	69
Figura 45 – Largura da mesa colaborante.	70
Figura 46 – Detalhamento seção retangular V22.....	72
Figura 47 – Detalhes furação projeto estrutural.	74
Figura 48 – Representação do furo F1.....	75
Figura 49 – Esforços para dimensionamento das seções S ₁ -S ₁ e S ₂ -S ₂ do furo F1. 76	
Figura 50 - Esforços das seções S ₁ -S ₁ e S ₂ -S ₂ do furo F1.....	77

Figura 51 – Ábaco seção retangular submetida à flexão composta reta.....	78
Figura 52 – Ábaco II-11 com valores calculados.....	79
Figura 53 – Detalhe furo F1.....	84
Figura 54 – Representação do furo F7.....	85
Figura 55 – Esforços para dimensionamento das seções S ₁ -S ₁ e S ₂ -S ₂ do furo F7. 85	
Figura 56 - Esforços das seções S ₁ -S ₁ e S ₂ -S ₂ do furo F7.....	87
Figura 57 – Detalhe furo 7.....	90
Figura 58 – Apresentação calculadora de furos em vigas no programa TQS.	92
Figura 59 – Dados dos materiais da viga V22 no programa TQS.	93
Figura 60 – Dados da seção transversal da viga V22 no programa TQS.	93
Figura 61 – Armaduras da viga V22 no programa TQS.	93
Figura 62 – Dados do carregamento do furo F1 no programa TQS.....	94
Figura 63 – Geometria do furo F1 no programa TQS.....	94
Figura 64 – Critérios de dimensionamento do furo F1 – Parte 1 no programa TQS. 95	
Figura 65 – Critérios de dimensionamento do furo F1 – Parte 2 no programa TQS. 96	
Figura 66 – Carregamento 1 para o furo F1 no programa TQS.	97
Figura 67 – Dados de saída do TQS – furo F1 no programa TQS.....	97
Figura 68 – Dados do carregamento do furo F7 no programa TQS.....	98
Figura 69 – Geometria do furo F7 no programa TQS.....	99
Figura 70 – Carregamento 1 para o furo F7 no programa TQS.	99
Figura 71 – Dados de saída do TQS – furo F7 no programa TQS.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre as atualizações de dimensões limites para não verificação das aberturas.	33
Tabela 2 - Comparação entre os autores com as dimensões limites para cálculo das armaduras de reforços.	50
Tabela 3 – Determinações furos, esforços característicos e altura da linha neutra. .	73
Tabela 4 – Verificação das condições limites NBR 6118:2023.	75
Tabela 5 – Diferença em porcentagem entre as áreas de aço encontradas.	100
Tabela 6 - Comparação entre as atualizações da NBR 6118.....	103

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Contextualização	16
1.2.	Justificativa	19
1.3.	Objetivos	23
1.3.1.	Objetivo geral	23
1.3.2.	Objetivos específicos	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1.	Norma ABNT NBR 6118.....	24
2.1.1.	Norma NB-1 (1940)	25
2.1.2.	Norma NB-1 (1960)	26
2.1.3.	Norma NB-1 (1978)	26
2.1.4.	Norma NB-1 (1980) → NBR 6118	28
2.1.5.	Norma NBR 6118 (2003)	28
2.1.6.	Norma NBR 6118 (2007)	31
2.1.7.	Norma NBR 6118 (2014)	31
2.1.8.	Norma NBR 6118 (2023)	32
2.2.	Fritz Leonhardt & Eduard Mönnig (1978).....	34
2.3.	José Carlos Sússekind (1984)	38
2.4.	Péricles Brasiliense Fusco (1995).....	43
2.5.	José Milton Araújo (2014)	47
2.6.	Projeto estrutural.....	51
2.7.	Projeto de furações	53
2.8.	Importância da compatibilização de projetos	55
3.	METODOLOGIA.....	58
4.	ESTUDO DE CASO	61
4.1.	Características do edifício	61
4.2.	Projeto estrutural em análise	61
4.3.	Viga V22.....	63
4.3.1.	Apresentação da viga	63
4.3.2.	Esforços atuantes	67
4.3.3.	Vão efetivo, área de aço à flexão e altura da linha neutra.....	68
4.3.3.1.	Vão efetivo	69

4.3.3.2.	Área de aço à flexão	70
4.3.3.3.	Altura da linha neutra	72
4.4.	Análise e cálculo da furação	73
4.4.1.	Furo F1	75
4.4.2.	Furo F7	85
4.5.	Calculadora do TQS	91
4.5.1.	Dados da viga.....	92
4.5.2.	Dados do furo F1	94
4.5.3.	Dados do furo F7	98
4.6.	Comparações método Sússekind e TQS	100
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.1.	Conclusões	105
5.2.	Sugestões para futuros trabalhos.....	106
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

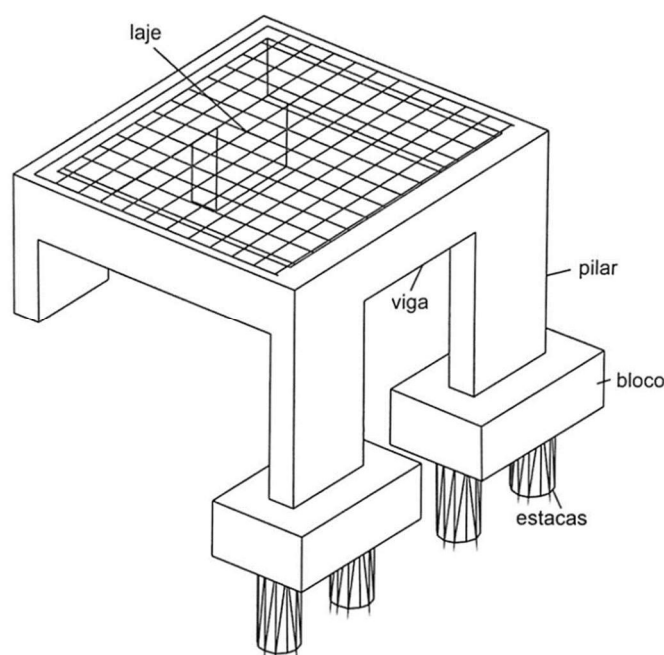
1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

O concreto armado é utilizado amplamente nas construções brasileiras e, conforme citado por Süsskind (1980), as três razões básicas para a sua viabilidade são: a união entre concreto e aço, pois trabalham com aderência e em conjunto; os coeficientes de dilatação de ambos os materiais são próximos e a garantia de durabilidade da estrutura devido ao concreto proteger o aço da oxidação. Dessa forma, é importante ficar atento a essas propriedades quando se trabalha com esses materiais em integração.

Ainda, muitas construções são formadas por elementos estruturais de concreto armado a fim de suportar todos os esforços nelas aplicados. Esses elementos são divididos em: lajes, vigas, pilares e fundações. De acordo com Carvalho e Filho (2016), o modo como os elementos estruturais são arranjados forma o sistema estrutural. Na Figura 1 é apresentado o sistema estrutural em concreto armado de uma garagem na qual visualiza-se as peças anteriormente comentadas. Portanto, neste trabalho serão analisadas apenas as vigas em concreto armado.

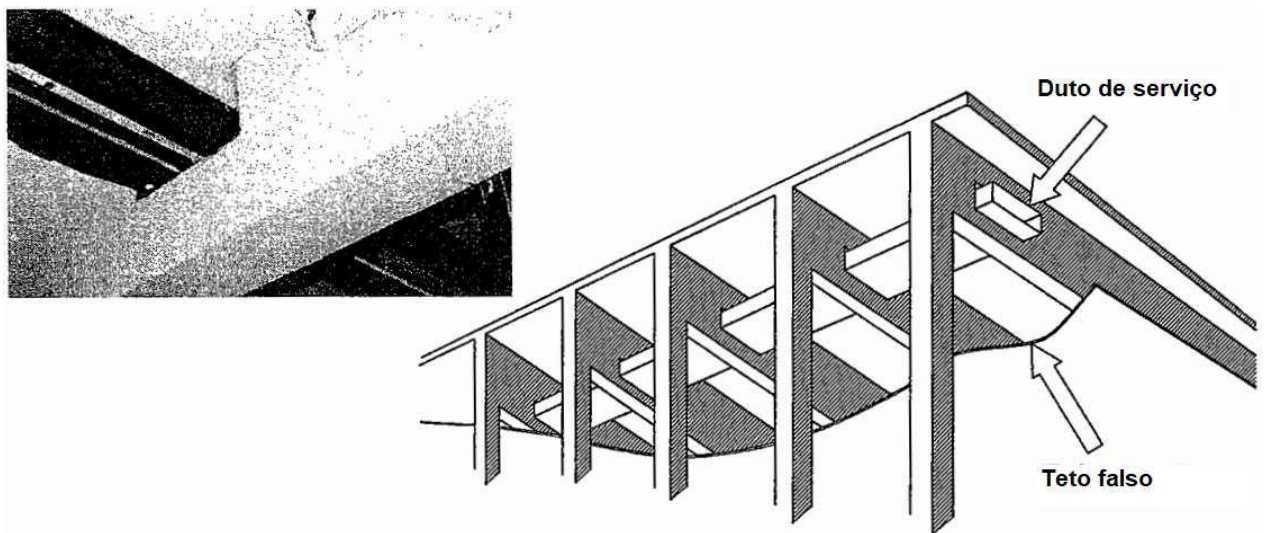
Figura 1 - Sistema estrutural de uma garagem.



Fonte: Carvalho e Filho (2012).

Assim, a estrutura de uma edificação suporta cargas desde a sua construção até a sua utilização final. Por conseguinte, é de extrema importância a análise de qualquer modificação em seu esqueleto padrão. Uma dessas alterações é a adição de furos para a acomodação de tubulações utilizadas para serviços essenciais, como instalações elétricas, hidráulicas, sanitárias, telefônicas, entre outras. Portanto, especificamente em relação ao elemento estrutural “viga” é bastante notória a incorporação de furos horizontais transversais, como apresentado na Figura 2, na qual se observa a passagem de um duto de serviço por diversas vigas paralelas alterando o elemento estrutural original.

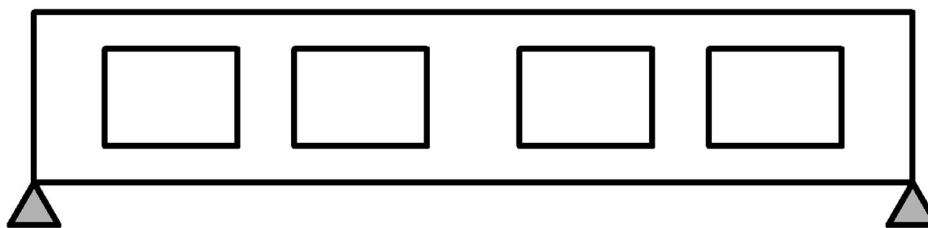
Figura 2 - Duto de serviço transversal em vigas de concreto armado.



Fonte: Adaptada de Mansur e Tan (1999).

Outrossim, é indispensável comentar sobre a existência das vigas Vierendeel, que possuem vãos abertos e são projetadas com grandes aberturas em sua alma, as quais podem ser identificadas como na Figura 3. Cimadevila e Gutiérrez (2003) comentam que as vigas Vierendeel surgiram essencialmente pela necessidade da passagem de tubulações ou pessoas.

Figura 3 – Viga Vierendeel.



Fonte: Adaptada de Rocha (1911).

Em relação aos furos em vigas maciças, um dos principais pontos para uma boa execução é a compatibilização entre projeto estrutural e projetos complementares (hidráulicos, sanitários, elétricos etc.). Conforme Agostinho (2009, *apud*. Farias, 2019), a compatibilização de projetos gera uma economia em materiais e tempo, visto que as atividades são realizadas simultaneamente e em grupos especializados em suas funções. Logo, é necessário que todos os projetos estejam em concordância para evitar problemas durante a construção, eliminando retrabalhos, diminuindo custos e prazos, proporcionando, assim, uma melhor qualidade à obra.

Essa compatibilização, assunto técnico atual, interliga-se diretamente com a metodologia BIM (Building Information Modeling). Nessa metodologia ocorre uma compatibilização dos projetos anteriormente à execução em obra e, dessa forma, os furos podem ser melhor dispostos nas vigas, resultando em economia e segurança. Além disso, ao pensar nessas aberturas com antecedência, pode-se também: diminuir a quantidade dessas em uma viga, diminuir a quantidade de aço a ser utilizado, dimensionar a viga conforme a quantidade de furos requisitados promovendo uma estrutura mais segura para toda a edificação, entre outros.

Desta maneira, é imprescindível o estudo de uma viga com furos horizontais transversais, tendo em vista os critérios de segurança, economia, qualidade e durabilidade das estruturas.

1.2. Justificativa

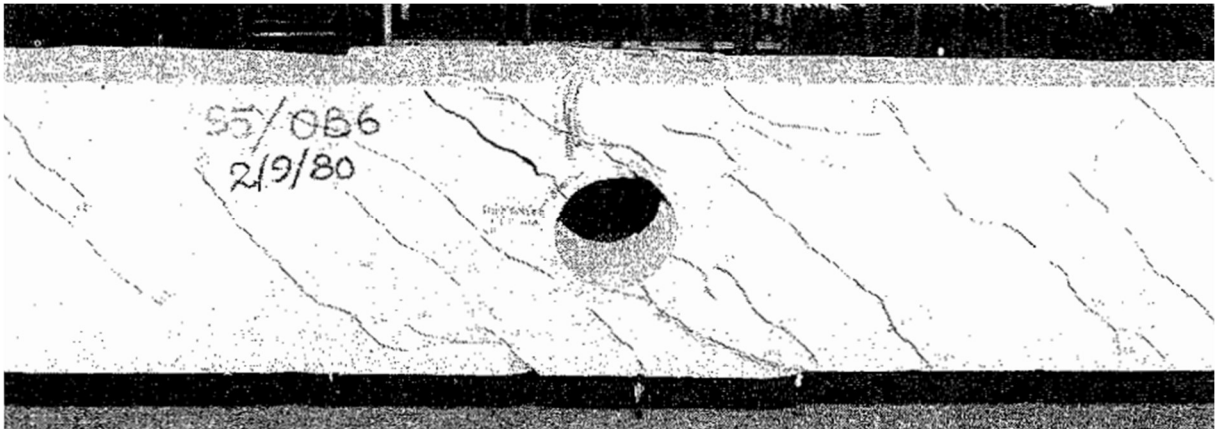
Conforme cita Brixner (2017) devido à redução do tempo de obras, muitas construtoras ignoram fases importantes de planejamento de uma edificação, como, por exemplo, a compatibilização do projeto estrutural com os demais, o que reflete em diversos problemas, sendo um desses a localização dos furos horizontais em vigas.

Visando essa questão, Simão (2014) cita que a frequente inserção de aberturas em vigas de concreto armado durante as construções de edifícios, sem projeto ou sem a devida compatibilização, pode propiciar elementos estruturais expostos ao enfraquecimento e uma possível instabilidade em todo sistema estrutural, comprometendo a segurança do prédio e seus habitantes.

Além disso, a inserção de aberturas acarreta prejuízos quando não planejada. Em um escritório de projetos estruturais existem algumas situações que poderiam ser evitadas se ocorresse compatibilização dos projetos. Como a situação da montagem das fôrmas das vigas em obras simultaneamente a colocação dos furos nas vigas em programas para análises estruturais, ou seja, durante a execução do elemento estrutural, a construtora pede uma análise da disposição dos furos em projeto. Nessa situação, se a contratante não aguardar a avaliação do engenheiro de estrutura, pode-se gerar riscos em decorrência da má localização das aberturas ou até mesmo gastos adicionais com reforços na estrutura.

De acordo com Mansur e Tan (1999) é notório que a inclusão de furos nas vigas altera seu simples comportamento para um mais complexo, porque devido a mudança nas dimensões da alma da viga, os furos são sujeitos a concentração de tensões que podem levar a trincas ou a fissuras. Na Figura 4 é apresentada uma viga de concreto armado com um furo circular que estava sujeita a flexão oblíqua até sua típica ruptura por torção.

Figura 4 – Ruptura por torção por flexão oblíqua.



Fonte: Mansur e Tan (1999).

Outra exemplificação de furação inadequada ocorreu em um edifício em Brasília, no ano de 2003, sendo que essa problemática foi analisada pelo engenheiro civil Michel Henrique da Silveira, que cedeu as imagens para a autora. Nesse caso diversas vigas foram furadas em três diferentes pavimentos, alterando totalmente sua configuração inicial e as suas armações, como pode ser observado nas Figura 5, Figura 6 e Figura 7.

Figura 5 – Exemplo 1 de furação errada na viga.



Cedida para a autora.

Figura 6 – Exemplo 2 de furação errada na viga.



Cedida para a autora.

Figura 7 – Exemplo 3 de furação errada na viga.



Cedida para a autora.

Assim, torna-se de extrema importância a compatibilização do projeto estrutural com os demais, pois os projetos complementares determinam os posicionamentos das tubulações que, por muitas vezes, necessitam atravessar transversalmente, isto é, perpendicularmente ou inclinadamente, pelas faces laterais das vigas.

Devido à grande utilização do programa TQS em escritórios de projeto estrutural, e por se entender a importância de que os engenheiros conheçam as teorias científicas utilizadas na elaboração dos projetos de estruturas, durante este trabalho os furos serão analisados por meio do programa citado e por exemplo real detalhadamente descrito e apresentado neste trabalho.

Ademais, a Norma Técnica Brasileira NBR 6118 determina, através de critérios, como devem ser locados os furos, suas dimensões, formatos, distanciamentos entre tais e do elemento estrutural, entre outros. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014) Assim como as normas técnicas utilizadas em outros países também adotam critérios para disposição dessas aberturas em elementos estruturais, ainda, sugere-se que esses critérios sejam explorados em trabalhos futuros.

Dessa forma, com esse trabalho, pretende-se colaborar para o estudo de furos em vigas de concreto armado, associando os conhecimentos técnicos disponíveis na norma NBR 6118:2014 com a prática de um escritório de projetos estruturais e o programa TQS a fim de identificar possíveis alterações permitidas na inserção de furos, assim como contribuir para a compreensão da importância do bom posicionamento dessas aberturas em vigas.

Por fim, a análise, o dimensionamento e o detalhamento de aberturas em vigas tratam de uma etapa importante na elaboração de um projeto estrutural em concreto armado. Caso essa etapa seja executada de maneira errônea, ocorrerá a necessidade de reforço na estrutura e, conseqüentemente, gastos adicionais que poderiam ser evitados.

1.3. Objetivos

Os objetivos são classificados em geral e específicos.

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é compilar os métodos teóricos sobre localização, análise, dimensionamento e detalhamento de aberturas horizontais transversais em vigas de concreto armado.

1.3.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar, dimensionar e detalhar, por meio de cálculo manual e do programa TQS, a armadura de reforço dos furos contidos numa viga de concreto armado projetada em um escritório de projetos estruturais;
- Investigar como a etapa de inserção de furos no projeto estrutural é abordada em um escritório de projetos estruturais e sua importância;
- Comparar as revisões da norma técnica brasileira referentes a projetos de estruturas de concreto;
- Comparar autores referentes na área estrutural e suas possíveis diferenças em relação ao tema abordado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“O concreto é hoje empregado em virtualmente todos os tipos de estruturas e, dado seu custo mais baixo, vem, cada vez mais intensamente, ocupar lugares antes exclusivos de outros materiais estruturais” (Süssekind, 1980).

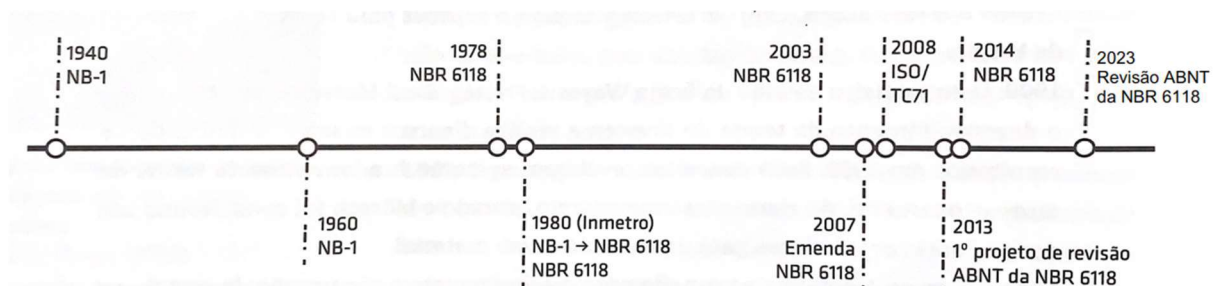
No decorrer da pesquisa para este trabalho, foram encontrados poucos autores brasileiros, entre todos aqueles que possuem livros publicados na área estrutural de engenharia civil, que citam em específico os furos e semelhantes em vigas de concreto armado.

Dessa forma, nesse item serão detalhados os comentários dos principais autores brasileiros encontrados, assim como autores estrangeiros com traduções, e a Norma Técnica Brasileira 6118. Ainda, serão esclarecidos detalhes sobre os projetos estruturais e os projetos de furações e a importância da compatibilização entre ambos.

2.1. Norma ABNT NBR 6118

A Norma Técnica Brasileira (NBR) 6118:2023 tem um histórico de utilização desde a fundação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em 1940. Na Figura 8 destaca-se a evolução da norma brasileira no decorrer das décadas, sendo que a sua última atualização se deu no ano de 2023.

Figura 8 - Linha cronológica NBR 6118.



Fonte: Adaptada de Porto e Fernandes (2015).

A seguir, será analisada individualmente cada revisão em relação à inserção de furos e semelhantes em vigas de concreto armado.

2.1.1. Norma NB-1 (1940)

Primordial a criação da ABNT, na década de 30 era utilizada a norma alemã DIN 1045. Dessa forma, a primeira norma técnica de concreto armado foi fortemente influenciada por seus critérios (Carneiro, 1993).

Logo mais, a primeira norma desenvolvida para projeto e dimensionamento das estruturas de concreto armado foi nomeada NB-1: cálculo e execução de obras de concreto armado e publicada em 1940. De acordo com Porto e Fernandes (2015), “Essa norma previa o dimensionamento em serviço baseado nas tensões admissíveis e no estado-limite último.”

Assim, ao averiguar a norma em relação a nomenclatura furos e aberturas, não é possível encontrar colocações sobre esses especificamente em vigas. Contudo, no Item F Art. 46 da NB-1 é citada a colocação de canalização no núcleo de peças de estrutura de concreto armado, sendo que essa não deve influenciar na redução da resistência da peça. Portanto, os critérios deveriam ser considerados para elementos estruturais de concreto armado em geral.

Nesse item determinava-se que, em diferentes áreas da estrutura, o diâmetro externo das canalizações, exceto quando estas atravessam completamente no sentido da espessura, não poderia exceder um terço da espessura do concreto, e a distância entre eles, medida de centro a centro, não poderia ser inferior a 8 diâmetros. Em elementos submetidos a compressão, não era permitida a instalação de canalizações que não estivessem previstas no cálculo estrutural e ocupassem mais de 4% da área transversal (Thomaz, [s.d.]).

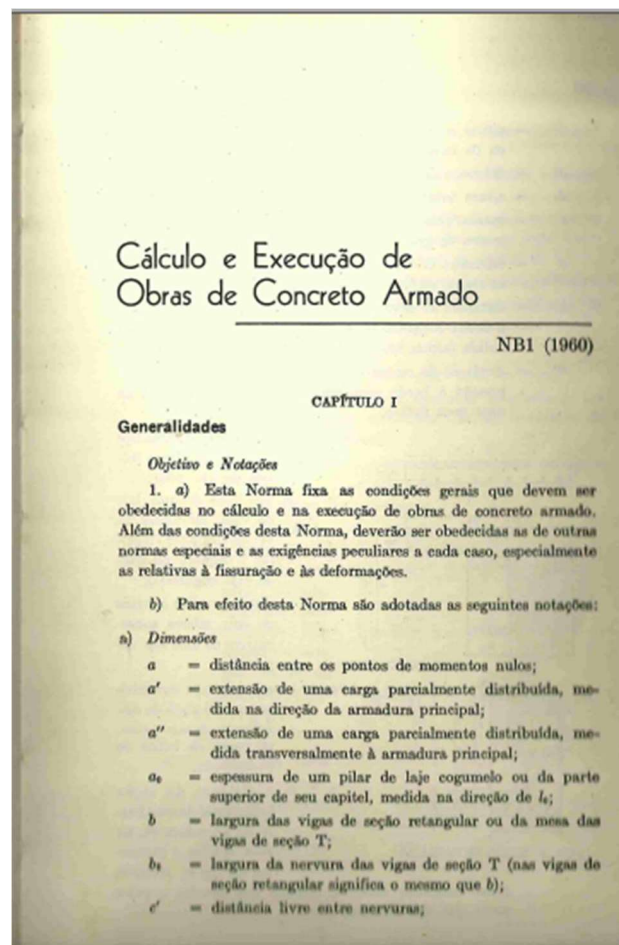
Além disso, a instalação de canalizações para transporte de fluidos com temperaturas que difiram em mais de 15°C da temperatura ambiente não era permitida e o uso de canalizações projetadas para suportar pressões internas que excedessem 10% da pressão atmosférica era autorizado apenas em elementos estruturais quando as canalizações atravessam completamente a peça no sentido da espessura.

Portanto, essa foi a consideração encontrada sobre furação em elementos estruturais na NB-1 do ano de 1940.

2.1.2. Norma NB-1 (1960)

Em 1960 foi publicada a primeira revisão oficial da norma NB-1, essa atualização utilizou como referência as normas europeias do Comité Euro-International du Béton (CEB). Na Figura 9 apresenta-se a capa da norma de cálculo e execução de obras de concreto armado.

Figura 9 - Norma NB-1 1960.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1960).

Em relação ao item F sobre canalizações, o artigo que cita as especificações passou a ser Art. 52, mas os critérios não foram alterados. Portanto, nessa revisão ainda eram considerados os mesmos parâmetros da norma de 1940.

2.1.3. Norma NB-1 (1978)

A próxima alteração na norma brasileira ocorreu em 1978. A formatação dessa revisão se assemelha à conhecida atualmente, assim como, percebe-se a alteração

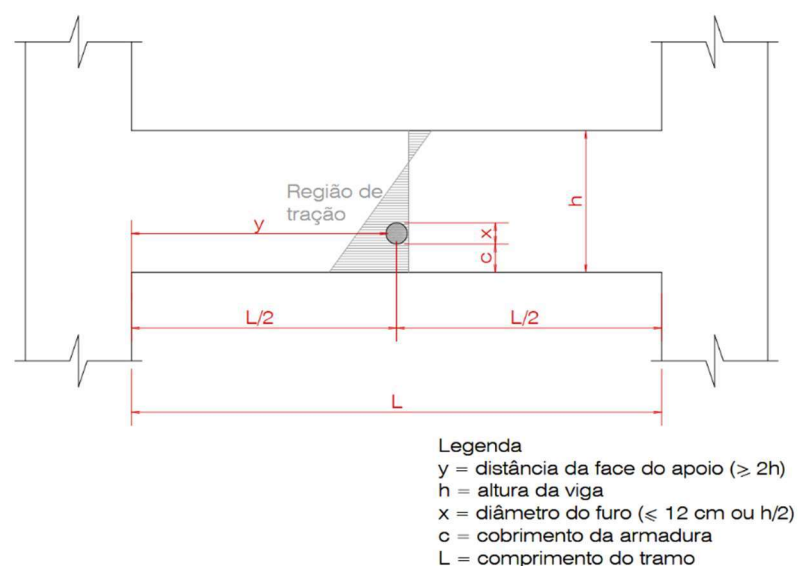
da divisão de tópicos alfabéticos para tópicos numéricos. Ademais, também modificaram o título de “Cálculo e execução de obras de concreto armado” para “Projeto e execução de obras de concreto armado”.

Em relação à inclusão de furos nas peças, foi adicionado o item 6.2, que além de comentar sobre canalizações embutidas, também cita aberturas. No subitem 6.2.1 sobre aberturas é parametrizado que, ao prever aberturas em qualquer peça de concreto armado, deveria ser certificado que os limites estabelecidos pela norma para o efeito de resistência e deformação não fossem ultrapassados (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1978).

Além disso, nesse subitem é determinado que não há necessidade de verificação das aberturas em vigas que atravessam na direção de sua espessura nas seguintes situações (Figura 10):

- existir apenas uma abertura no meio do tramo;
- inseridas a uma distância da face de apoio maior que 2 vezes a altura da viga e em zona de tração;
- dimensão transversal não deve ser superior a 12 centímetros nem a metade da altura da viga ($h/2$), além de não interromper qualquer barra da armadura;
- obedecer aos critérios de cobrimentos da armadura.

Figura 10 – Dimensões limites para não verificação das aberturas conforme NB-1 1978.



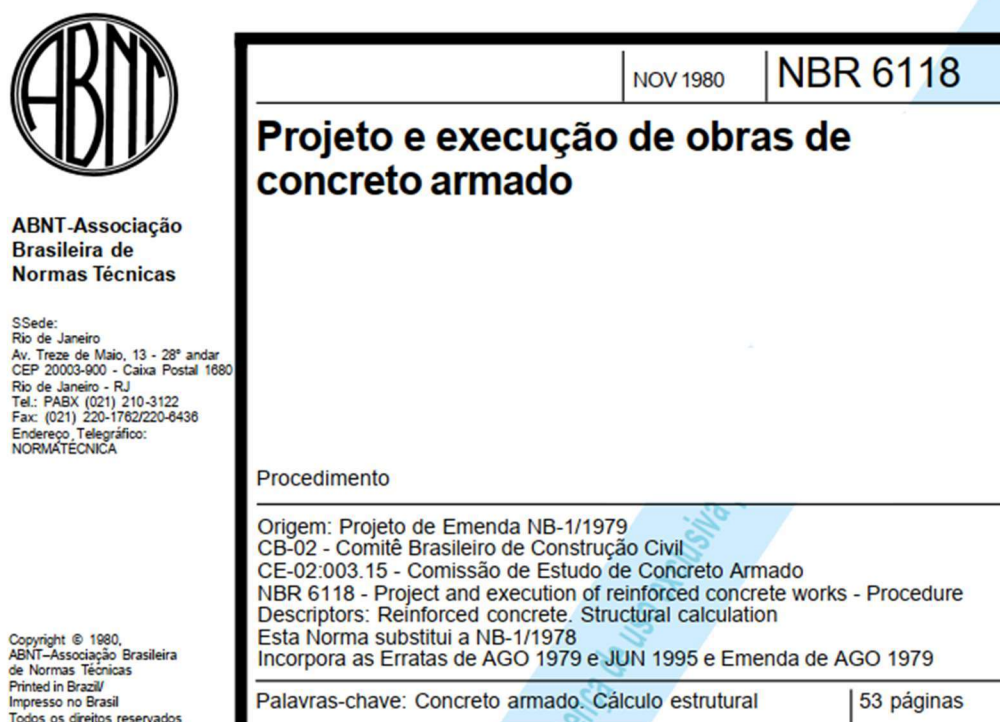
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

No subitem 6.2.2 são comentados os casos que não é permitida a integração de canalizações atravessando transversalmente peças estruturais, sendo esses: canalizações sem isolamento apropriado ou avaliação especial caso for passagem de fluídos com temperaturas que diferem mais de 15°C da temperatura ambiente e canalizações que suportem pressões internas superiores a 3 kgf/cm².

2.1.4. Norma NB-1 (1980) → NBR 6118

Em 1980 não ocorreu nenhuma revisão em relação ao texto da normativa, a mudança nesse ano foi essencialmente o registro desta norma no Inmetro, sendo que essa recebeu a nova identificação de NBR 6118, conforme Figura 11 (Porto e Fernandes, 2015). Dessa forma, é claro, em relação as aberturas e canalizações embutidas foram mantidos os critérios da revisão do ano de 1978.

Figura 11 - Capa da NBR 6118:1980.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1980).

2.1.5. Norma NBR 6118 (2003)

Em 2003, ocorreu uma modificação significativa na norma NBR 6118, a qual passou por uma reorganização drástica dos capítulos, dando maior ênfase à parte de projetos e fazendo referência às outras normas apenas no contexto da execução.

Assim, o título foi alterado de “Projeto e execução de obras de concreto armado” para “Projeto de estruturas de concreto armado – Procedimento”.

Além disso, houve uma unificação abrangendo todas as categorias de concreto (simples, armado e protendido), bem como a introdução de quatro classes de agressividade ambiental (CAA). Além disso, foram incluídas considerações sobre os efeitos globais de segunda ordem, requisitos de durabilidade, qualidade e análise estrutural (Porto e Fernandes, 2015).

Com essas mudanças expressivas, foi, finalmente, adicionado a nomenclatura “furo” na normativa. Logo, o item 13.2.5 contém informações sobre os limites para as dimensões de furos e aberturas, enquanto o item 13.2.6 estabelece os critérios de canalizações embutidas.

Em relação a furos e aberturas, são estabelecidos limites no item 21.3, logo, esse determina que estruturas que necessitam de aberturas em seu projeto devem ser projetadas e detalhadas levando em conta as alterações nas tensões que ocorrem ao redor dessas aberturas. Além das armaduras para resistir aos esforços de tração, é necessário prever a utilização de armaduras complementares localizadas ao redor e nos cantos das aberturas, a fim de garantir a integridade estrutural. Assim, ao prever a inserção de furos e aberturas em peças estruturais devem ser verificados o efeito de resistência e a deformação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003).

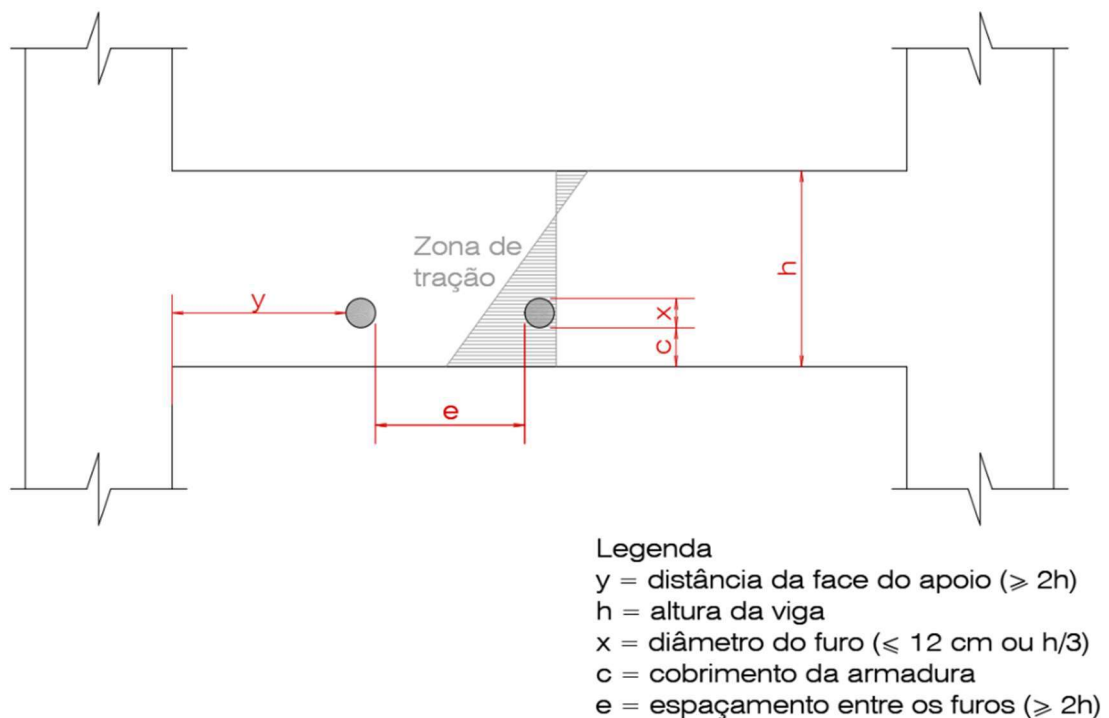
Quanto aos critérios de dimensionamento, de acordo com a norma, os furos devem ter dimensões pequenas em relação ao elemento estrutural, enquanto as aberturas não têm essa restrição. No caso de um conjunto de furos muito próximos, é necessário considerá-los como uma única abertura para fins de análise e projeto.

Atentando-se ao item 13.2.5.1, que estabelece os limites de furos que atravessam vigas na direção de sua largura, objeto de estudo deste trabalho, tem-se que, independentemente da situação, é exigida uma distância mínima entre um furo e a face mais próxima da viga de pelo menos 5 cm e duas vezes o valor do cobrimento previsto para essa face. Assim como a seção restante nessa região, após retirar a área ocupada pelo furo, deve ser capaz de suportar as cargas estimadas no cálculo estrutural, além de permitir uma adequada aplicação do concreto.

Ainda nesse item, são determinadas as condições para a dispensa de verificação da furação transversal na viga (Figura 12), sendo essas:

- furos em zona de tração e a uma distância da face do apoio de no mínimo 2 vezes a altura da viga;
- dimensão do furo de no máximo 12 centímetros e um terço ($1/3$) da altura da viga;
- distância entre faces de furos, num mesmo tramo, de no mínimo 2 vezes a altura da viga;
- cobrimentos suficientes e não seccionamento das armaduras.

Figura 12 – Dimensões limites para não verificação das aberturas conforme NBR 6118:2003.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Em relação ao item de canalizações embutidas não foram alterados os critérios desde a revisão de 1978, contudo notou-se a mudança de unidade de medida do limite de pressão interna para o sistema internacional, sendo que determinaram de 3kgf/cm^2 para $0,3 \text{ MPa}$.

2.1.6. Norma NBR 6118 (2007)

Em 2007, a NBR 6118 passou por uma emenda, essa modificação não influenciou nos critérios de furos em vigas de concreto armado. Mantendo os parâmetros da revisão de 2003.

Além disso, de acordo com Porto e Fernandes (2015), em 2008, a normativa foi validada pela reunião plenária ISO/TC-71, através do Comitê responsável por estabelecer diretrizes e parâmetros para as normas técnicas de concreto armado e protendido, e certificada como uma norma de padrão internacional.

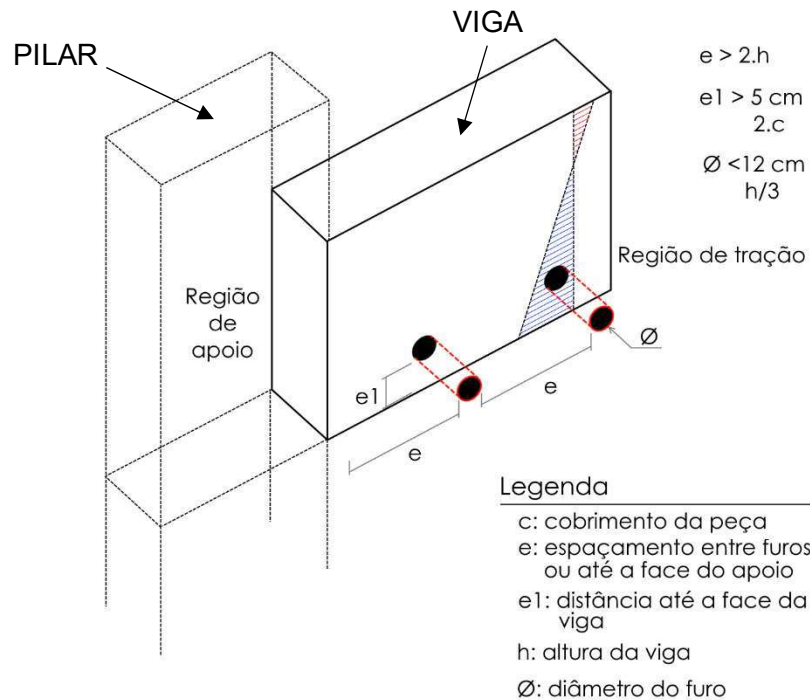
2.1.7. Norma NBR 6118 (2014)

Em julho de 2013, foi divulgado o primeiro projeto de revisão da ABNT NBR 6118, pelo Comitê Brasileiro da Construção Civil, submetido a um período de consulta pública para obter a aprovação das alterações propostas. Após análise e discussão do projeto de revisão, a versão final da norma foi publicada em abril de 2014. Contudo, essa foi substituída pela versão corrigida da NBR 6118, que incorpora a Errata 1 datada de 7 de agosto de 2014 (Porto e Fernandes, 2015).

Essa última edição da norma estabelece requisitos e procedimentos de projeto para estruturas de concreto de alto desempenho, com resistência à compressão de até 90MPa. Para viabilizar essa mudança, foram ajustados os domínios de cálculo, o diagrama tensão-deformação do concreto e a formulação para determinação do módulo de elasticidade, levando em consideração o tipo de agregado utilizado.

Em relação aos itens sobre furos, aberturas e canalizações embutidas não foram realizadas modificações nos critérios de dimensões limites, ou seja, as seções 13.2.5 (Furos e aberturas) e 13.2.6 (Canalizações embutidas) da NBR 6118. Contudo, foi adicionado aos parâmetros de cálculos e detalhamentos, na seção 21.3 (Furos e aberturas), que caso os limites estabelecidos na seção anteriormente citada não sejam obedecidos, a verificação estrutural deve ser realizada pelo método de bielas e tirantes, explicado no item 22.3 (Método de bielas e tirantes) da normativa. Na Figura 13 é apresentada uma representação gráfica dos critérios de dimensões limites para a inserção de furos horizontais atravessando transversalmente uma viga de concreto armado.

Figura 13 – Dimensões limites para inserção de furos que atravessam as vigas.



Fonte: Adaptada de Pintos (2022).

2.1.8. Norma NBR 6118 (2023)

Em 28 de agosto de 2023 publicou-se a versão mais atualizada da norma “NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto”. Durante o comitê técnico ABNT/CB-002 Construção civil, a revisão foi aprovada. Apesar de diversas mudanças, os itens relacionados a furação se mantiveram os mesmos, até mesmo a sua numeração.

É notório que há vinte anos não houve alterações dos parâmetros das condições para a dispensa de verificação da furação transversal na viga. Logo mais, através dessa análise detalhada, constatou-se, na íntegra, que ocorreram poucas mudanças nos critérios de integração de furos no elemento estrutural viga de concreto armado durante todas as revisões da norma NBR 6118. Porto e Fernandes (2015) cita

A revisão da norma a cada cinco anos é de extrema importância para que, dessa forma, os novos conceitos sejam introduzidos de maneira gradativa e para que ela se adéque às novas tecnologias empregadas nos materiais e nas técnicas construtivas (Porto e Fernandes, 2015).

A seguir na Tabela 1 é apresentado um resumo das revisões que apresentação atualizações com as dimensões limites para não verificação das aberturas de acordo com a norma brasileira NBR 6118.

Tabela 1 - Comparação entre as atualizações de dimensões limites para não verificação das aberturas.

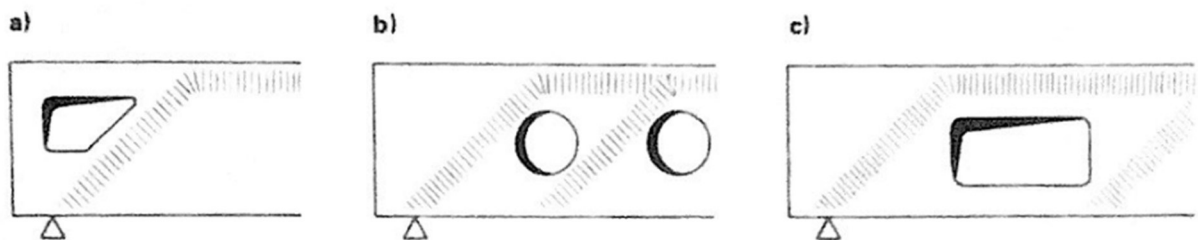
Revisão dos furos	1940	1978	2003
Diâmetro transversal	$\leq e/3$	$\leq 12 \text{ cm ou } \leq h/2$	$\leq 12 \text{ cm ou } \leq h/3$
Distância entre furos	8Φ (eixos)	N.I.	$\geq 2h$
Distância face de apoio	N.I.	$\geq 2h$	$\geq 2h$
Cobrimentos	N.I.	Sim	Sim
Informação adicional	N.I.	Uma abertura no meio do tramo	Não seccionamento armadura
		Zona de tração	Zona de tração
		Não interromper qualquer barra da armadura	

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

2.2. Fritz Leonhardt & Eduard Mönning (1978)

Para Leonhardt e Mönning (1978), a execução de aberturas para tubulações e similares em vigas é permitida na região onde há presença de força cortante, desde que as bielas de compressão importantes ou pórticos fechados permaneçam na alma, proporcionando rigidez suficiente. Na Figura 14 são apresentadas situações que os furos não interferem nas bielas de compressão, representadas pelas linhas tracejadas.

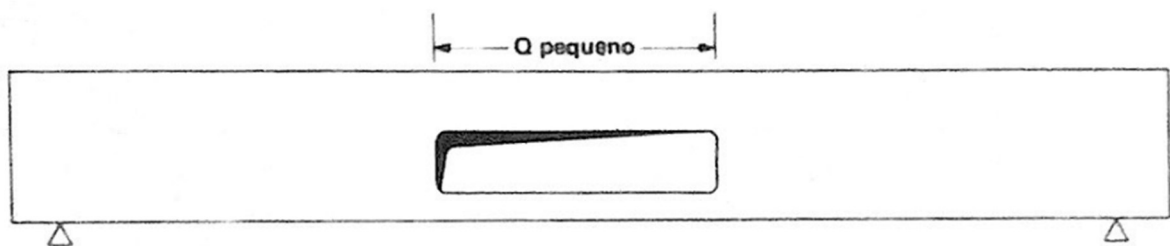
Figura 14 – Vigas com aberturas na alma.



Fonte: Leonhardt e Mönning (1978).

Além disso, em áreas de baixa força cortante, é possível realizar aberturas mais extensas, apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Viga com abertura extensa na alma.



Fonte: Leonhardt e Mönning (1978).

Os autores também comparam alguns tipos de aberturas e suas vantagens e desvantagens. Assim, as aberturas circulares são mais favoráveis do que aquelas com ângulos reentrantes (ângulos superiores a 180°), e é recomendado arredondar os vértices o máximo possível. Já, as aberturas com comprimento superior a 0,6 vezes a altura da viga devem ser consideradas no dimensionamento estrutural, para colocação de armaduras de reforços. E na região das aberturas extensas, a viga se comporta como um pórtico, assemelhando-se a uma viga do tipo Vierendeel (associação de vários quadros rígidos).

- Determinação das forças normais nos banzos, considerando iguais as partes superior e inferior da abertura, através da equação:

$$(-)D = Z = \frac{M_m}{z} \quad (1)$$

onde z = distância entre os eixos dos banzos;

- Determinação das forças cortantes nos banzos, sendo que o banzo que está comprimido absorve a maior parte da força cortante da seção m (Q_m), e admite-se que o banzo tracionado está fissurado, no Estádio II. Assim, têm-se as seguintes equações:

$$Q^{(sup)} = (0,8 \text{ a } 0,9)Q_m \quad (2)$$

$$Q^{(inf)} = (0,2 \text{ a } 0,1)Q_m \quad (3)$$

- Através da distribuição de Q_m é possível prever os estribos nos banzos;
- Determinação dos momentos fletores nos banzos conforme as equações:

$$M_{banzo\ max}^{(sup)} = \pm Q^{(sup)} * \frac{l'}{2} \quad (4)$$

$$M_{banzo\ max}^{(inf)} = \pm Q^{(inf)} * \frac{l'}{2} \quad (5)$$

- Dimensionar os banzos à flexão composta, sendo que:

$$N^{(sup)} = D \quad (6)$$

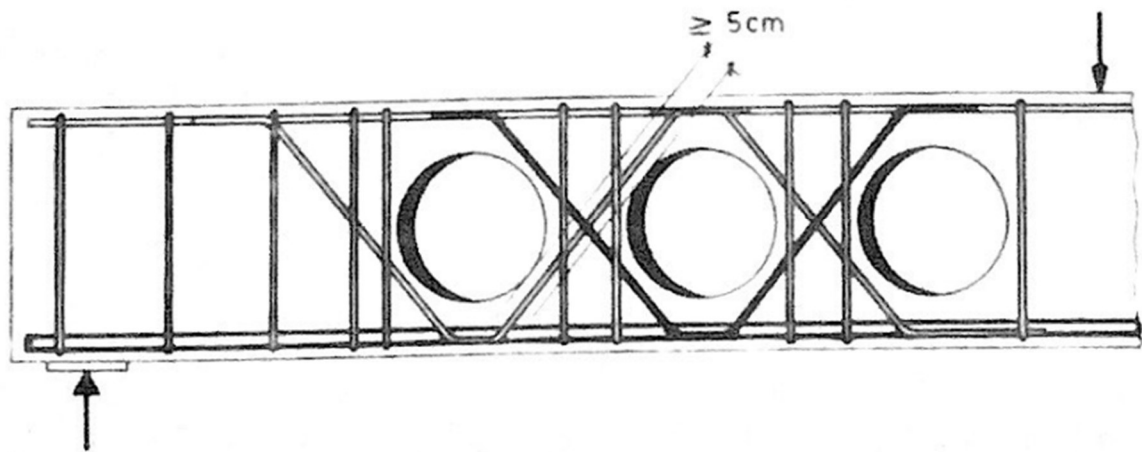
$$N^{(inf)} = Z \quad (7)$$

- Determinação da armadura de suspensão (A_{sws}), necessária nas extremidades da abertura, levando em consideração um esforço cortante equivalente a 0,80 vezes o esforço cortante na seção m (Q_m). Essa armadura deve ser distribuída em uma largura de $\frac{1}{4}$ da altura da viga em ambos os lados da abertura, quando estiver no lado mais afastado do apoio. Já quando for o lado mais próximo ao apoio, considerar apenas 1 a 3 estribos.

- Leonhardt e Mönning (1978) afirmam que em vigas com “maior” altura devem ser dispostas barras inclinadas nos vértices dos cantos reentrantes, como as linhas tracejadas na Figura 16.

No caso de vigas que possuam múltiplas aberturas circulares na alma, é necessário garantir que a distância entre as aberturas seja suficiente para formar uma treliça aproximada, com diagonais tracionadas e comprimidas se cruzando entre as aberturas. Para essa situação, é recomendado o uso de barras adicionais em formato V, atuando como armadura adicional de cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Armadura adicional em vigas com aberturas circulares.

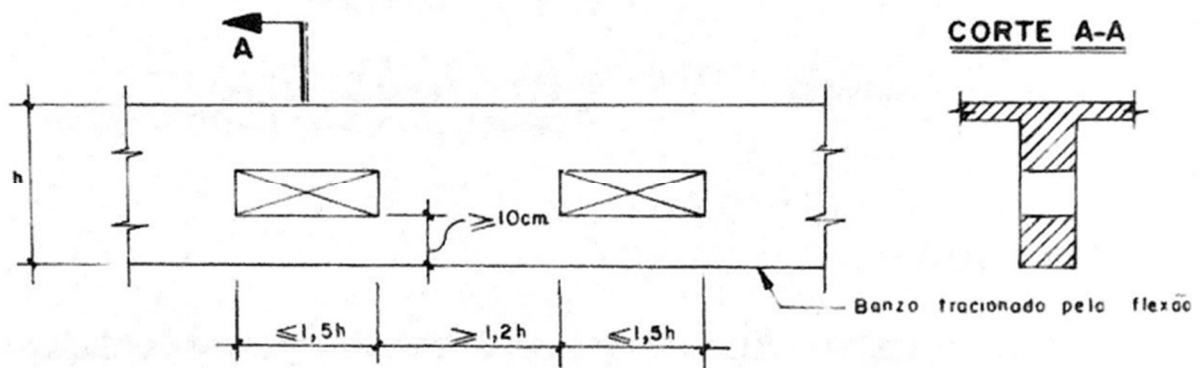


Fonte: Leonhardt e Mönning (1978).

2.3. José Carlos Sússekind (1984)

Sússekind (1984) estabelece que se forem respeitados os limites impostos na Figura 18, ou seja, a furação com distância igual ou maior a 10 centímetros da face da viga, largura do furo igual ou menor a 1,5 vezes a altura da viga e distância entre furos igual ou maior que 1,2 vezes a altura da viga, assim, a viga pode ser dimensionada como se não existissem furos em sua seção.

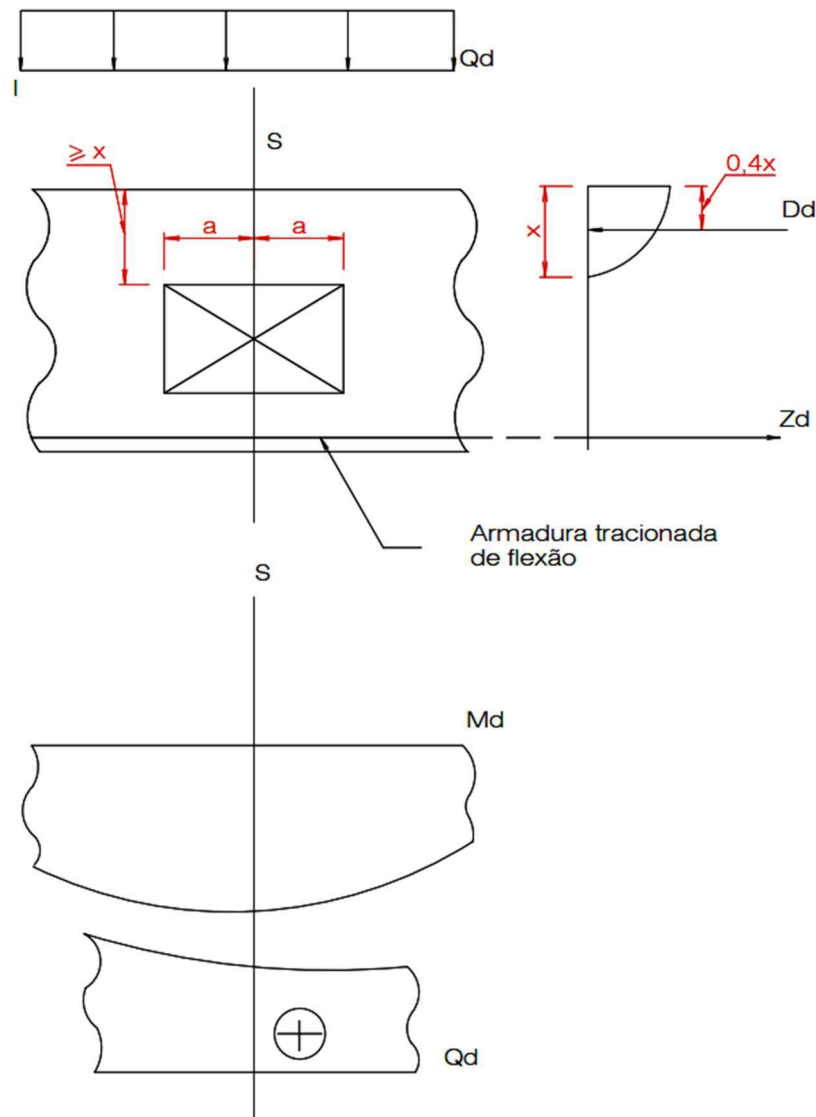
Figura 18 – Limites de furação transversal em vigas.



Fonte: Sússekind (1984).

Logo, essa viga com furos pode ser dimensionada como uma viga de seção cheia, permitindo a validade da hipótese da seção plana até mesmo na área furada. Dessa forma, na Figura 19 são apresentados os esforços calculados como uma viga maciça. Nessa, visualiza-se inicialmente que existe uma carga distribuída aplicada no elemento estrutural, a representação das tensões de compressão e tração e os diagramas resultantes de momentos e de esforços cortantes.

Figura 19 – Esforços calculados como viga maciça.

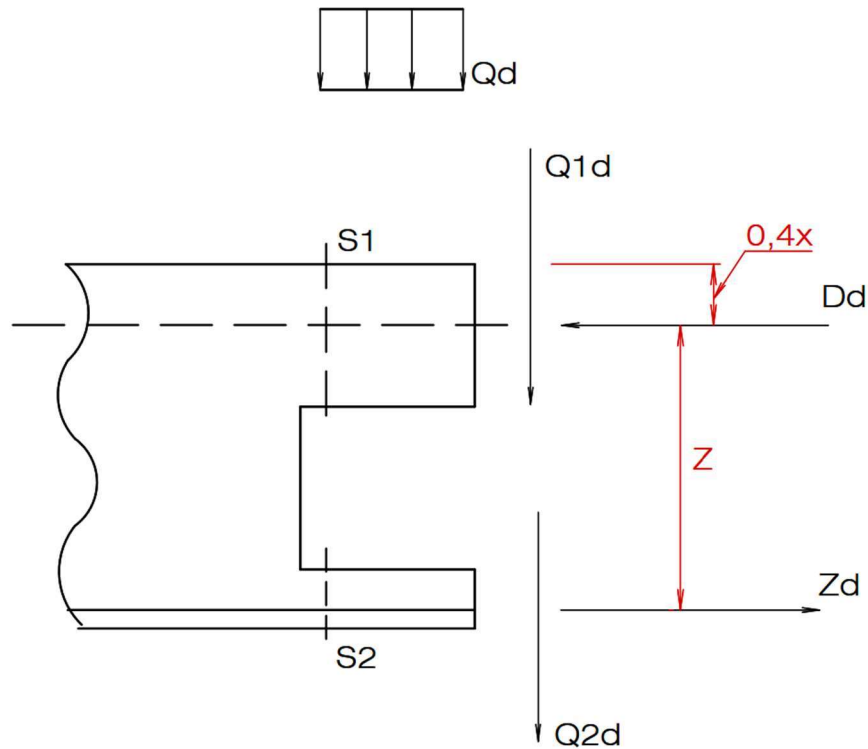


Fonte: Adaptada de Sússekkind (1984).

Caso esses parâmetros não sejam respeitados, o cálculo estático do elemento estrutural deve ser conforme os procedimentos clássicos da análise estrutural de um quadro fechado hiperestático (quadro plano multicelular fechado).

O procedimento local aplicado à região da abertura é simples e intuitivo. Ao cortar a viga através de um plano que atravessa o furo, assim como é mostrado na Figura 20, determinando-se as seções S_1 e S_2 , o equilíbrio é alcançado ao considerar os efeitos dos esforços atuantes nessa seção.

Figura 20 – Interseção da viga por plano no eixo do furo.

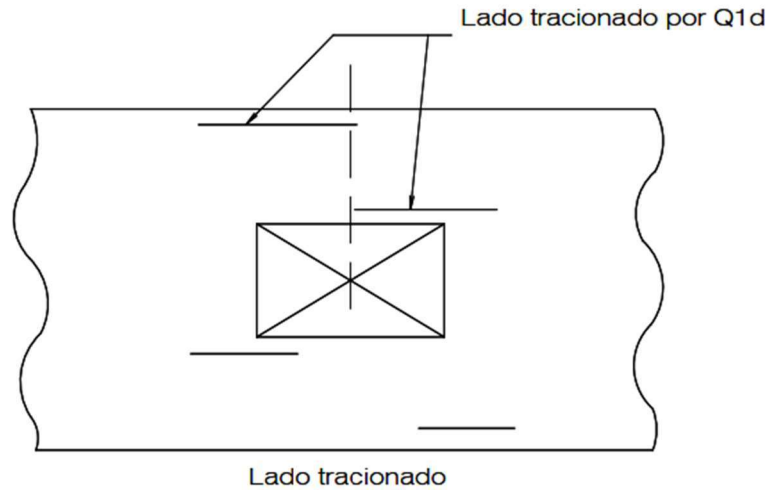


Fonte: Adaptada de Süsskind (1984).

Em outras palavras, o momento fletor está transferido pelas resultantes D_d (esforço de compressão) e Z_d (esforço de tração) no concreto e no aço, respectivamente.

Ademais, considerando a suposição de igual deformação vertical das seções superior e inferior ao furo, o esforço cortante total Q_d é dividido em duas frações (Q_{1d} e Q_{2d}) diretamente relacionadas à rigidez à flexão dessas seções. É importante ressaltar que a rigidez da região comprimida devido à flexão é equivalente à de uma seção comprimida (com seção cheia) de concreto, enquanto a rigidez da região tracionada (com fissuras) é exclusivamente fornecida pela presença de armaduras. Logo, Süsskind afirma que a força cortante na região comprimida é maior em todos os casos correntes. Assim, sugere-se adotar $Q_{1d} = Q_d$ e $Q_{2d} \cong 0,1 * Q_d$, sendo que a última equação assegura, indiretamente, uma limitação de fissuração para o tirante inferior devido a armadura suplementar determinada. Na Figura 21 está a representação das fibras tracionadas pelos cortantes Q_{1d} e Q_{2d} .

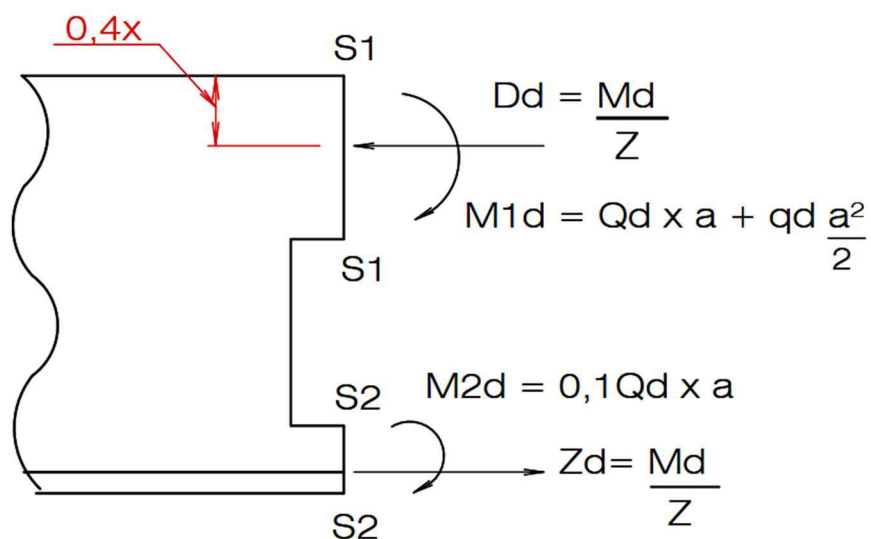
Figura 21 – Fibras tracionadas por Q_{1d} e Q_{2d} (supostos positivos).



Fonte: Adaptada de Süsskind (1984).

Para o dimensionamento, apresentando na Figura 22, tem-se que a seção S_1-S_1 é submetida ao esforço normal de compressão D_d , sendo que esse gera um momento fletor M_{1d} . Analogamente, na seção S_2-S_2 tem se um esforço normal de tração Z_d aplicado ao nível da armadura tracionada de flexão que proporciona o momento M_{2d} . Dessa forma, é notório que nesse estudo o banzo superior deve ser dimensionado a flexo-compressão e o banzo inferior a flexo-tração.

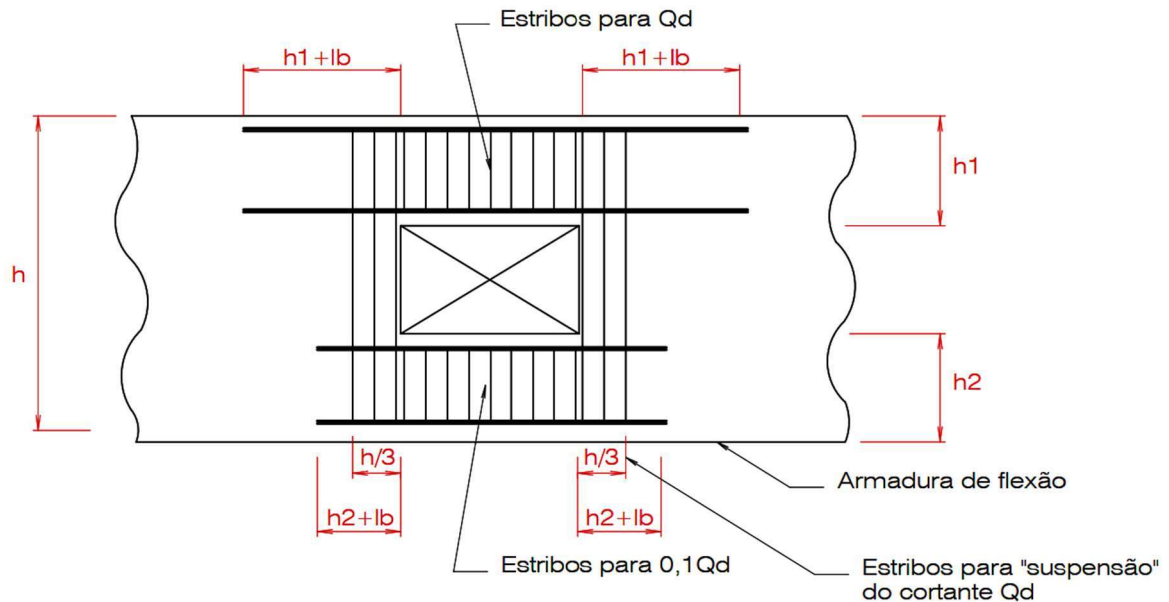
Figura 22 – Esforços para dimensionamento das seções S_1-S_1 e S_2-S_2 .



Fonte: Adaptada de Süsskind (1984).

Portanto, adota-se uma armadura simétrica de esforço na região do furo, para evitar problemas executivos, e, assim, o detalhamento dessa armadura é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Detalhamento da armadura de reforço do furo.



Fonte: Adaptada de Süsskind (1984).

Por fim, Süsskind (1984) conclui três observações principais:

- Claramente, é preferível posicionar o furo próximo às regiões onde a força cortante é nula, garantindo assim que a espessura do concreto comprimido pela flexão não seja comprometida. Além disso, é importante manter um "tirante" mínimo com 10 centímetros para permitir a instalação adequada da armadura de flexão, funcionando como uma espécie de elemento de contenção.
- Buscar valores reduzidos para a altura h_2 é uma abordagem teoricamente correta, com o objetivo de assegurar a transferência completa do esforço cortante através da região comprimida da viga.
- Se houver necessidade de posicionar uma abertura que intercepte a região de concreto comprimido pelo momento M_d , é necessário utilizar armadura de compressão na região do furo, de forma que a linha neutra

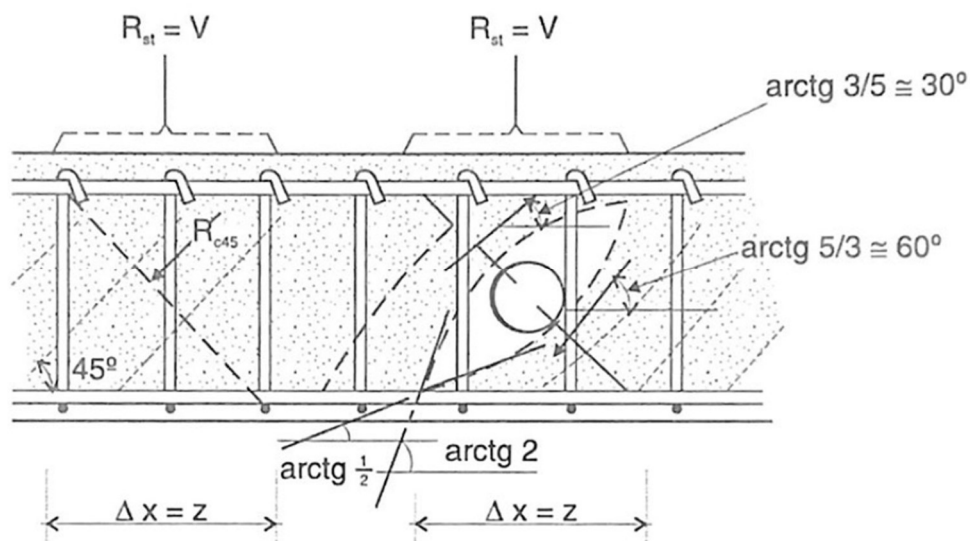
seja deslocada para uma posição que não seja interceptada pela abertura.

2.4. Péricles Brasiliense Fusco (1995)

Fusco (1995) comenta que o detalhamento das armaduras das vigas com aberturas é realizado com a suposição das bielas diagonais de concreto com inclinação entre aproximadamente 30° ($\arctg 3/5$) e 60° ($\arctg 5/3$) no que tange o eixo longitudinal do elemento estrutural.

Contudo, ele afirma que essas bielas suportam inclinações até entre aproximadamente $26,6^\circ$ ($\arctg 1/2$) e $63,4^\circ$ ($\arctg 2$), mas não é conveniente a consideração das tensões diagonais além da faixa mais restrita citada inicialmente. Assim, apresenta-se uma representação dessas considerações na Figura 24.

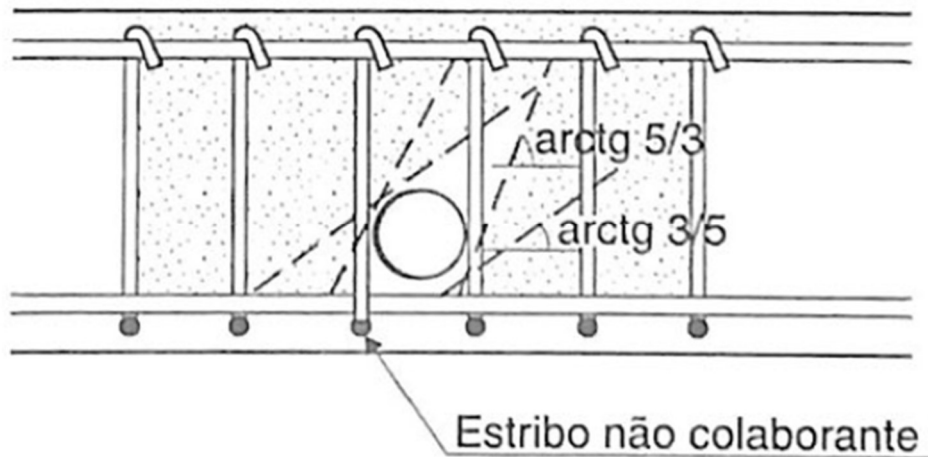
Figura 24 – Apresentação das inclinações das bielas de concreto.



Fonte: Fusco (1995).

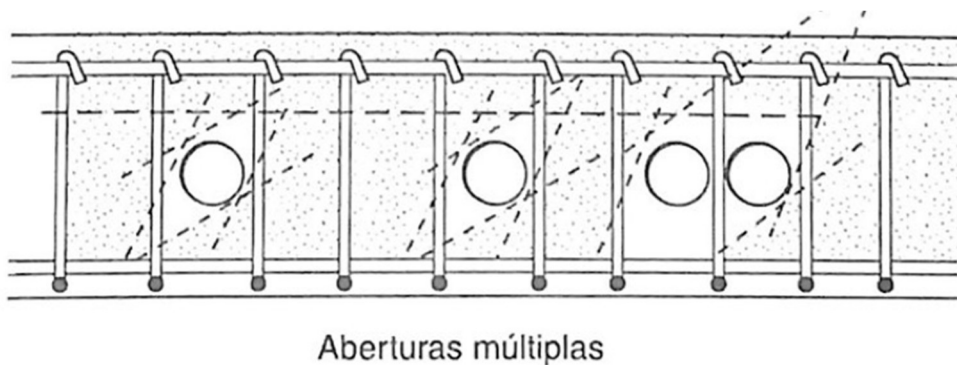
A Figura 25 ilustra como as aberturas na alma podem fazer com que determinados estribos não atuem de forma colaborativa, nota-se que a posição do furo está bem mais na parte tracionada da viga. Já a Figura 26 evidencia como as aberturas múltiplas podem comprometer significativamente a resistência do elemento estrutural.

Figura 25 – Apresentação do estribo não colaborante.



Fonte: Fusco (1995).

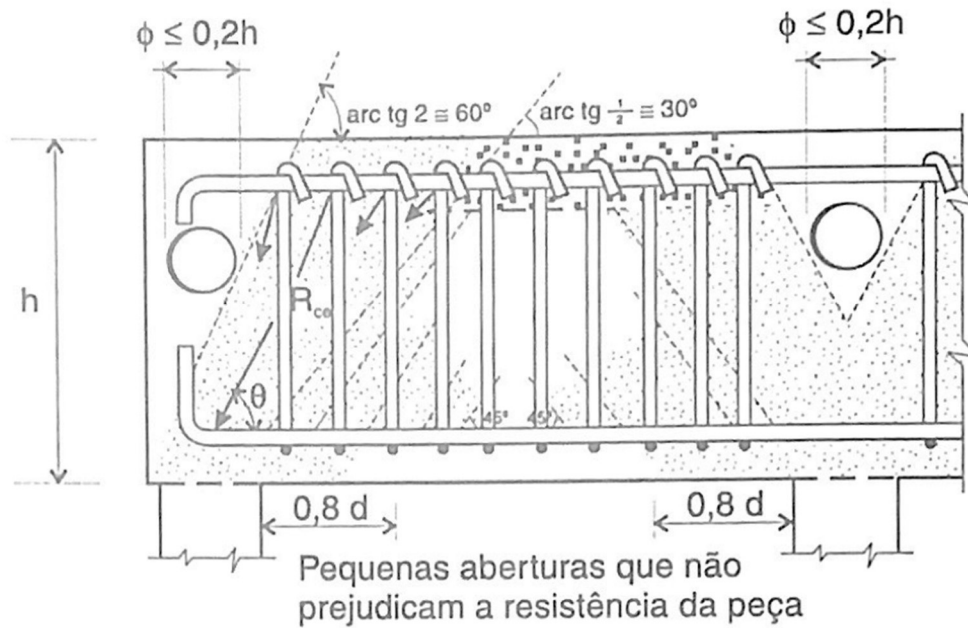
Figura 26 – Aberturas múltiplas na viga.



Fonte: Fusco (1995).

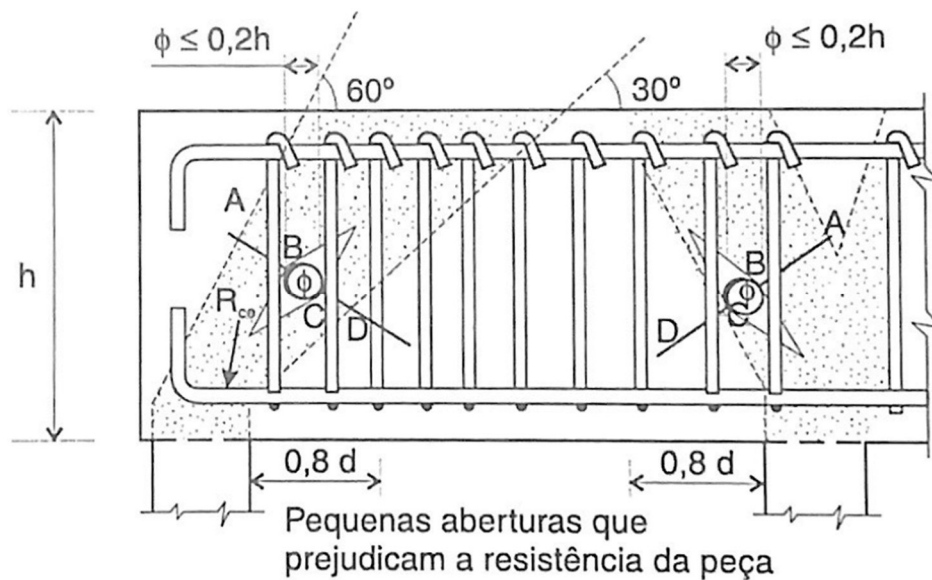
Além do mais, quando as aberturas são pequenas, sendo seus diâmetros até 0,2 vezes a altura da viga e de acordo com suas posições, a resistência da viga ao cisalhamento pode ser prejudicada ou não. A Figura 27 ilustra as pequenas aberturas que não prejudicam a resistência da peça, pois não interferem com as bielas de cisalhamento, enquanto na Figura 28 estão mostradas aquelas que prejudicam.

Figura 27 – Pequenas aberturas que não prejudicam a resistência da viga.



Fonte: Fusco (1995).

Figura 28 – Pequenas aberturas que prejudicam a resistência da viga.



Fonte: Fusco (1995).

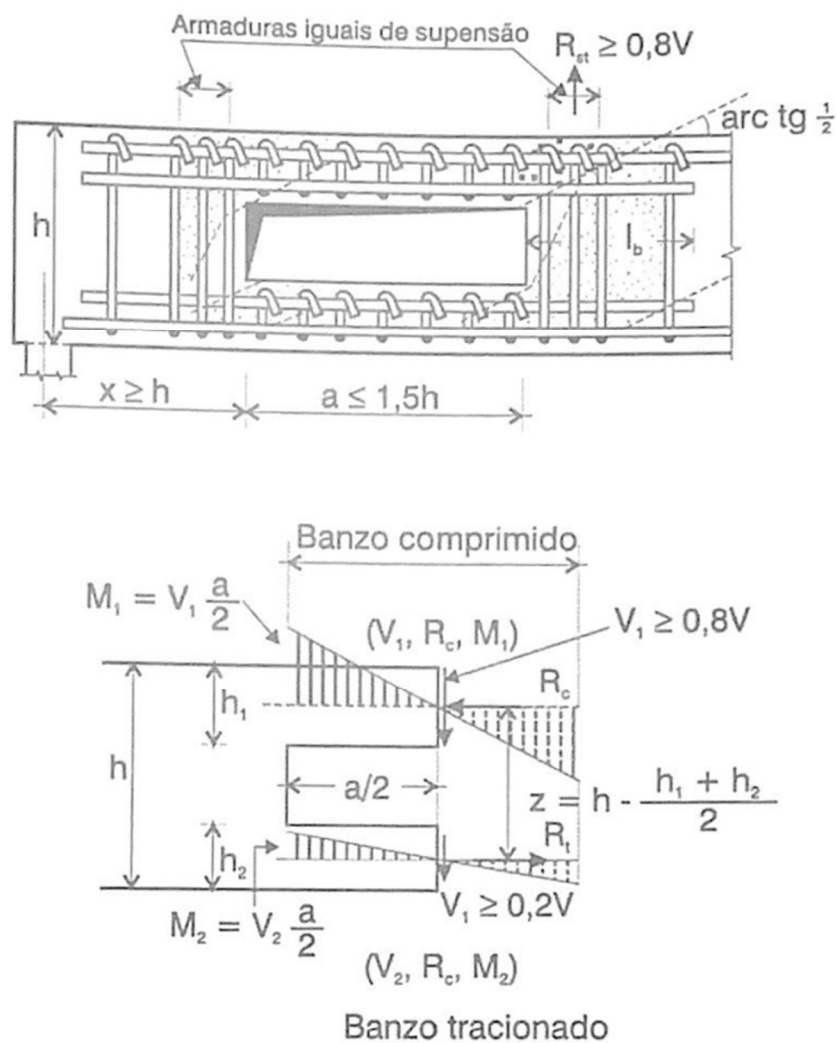
No segundo caso, quando as pequenas aberturas são posicionadas interferindo com as bielas de cisalhamento, é apresentado um critério para a consideração da redução da resistência, sendo esse:

$$\phi \leq 0,2 * h \therefore \tau_{wd} \leq \frac{0,8 * A_{(AB+CD)}}{A_{AD}} * 0,30 * f_{cd} \quad (8)$$

Dessa forma, quando o diâmetro do furo for inferior ou igual a 0,2 vezes a altura da viga, tem-se que a tensão de cisalhamento é menor ou igual ao quociente de 0,8 vezes a soma das áreas dos polígonos transversais AB e CD pela área do polígono transversal completo AD multiplicado por 0,30 vezes a resistência de cálculo de concreto (f_{cd}) da peça.

Em seguida, para o caso de grandes aberturas, porém não a ponto de eliminar o comportamento global da peça estrutural como um todo, Fusco considera os critérios mostrados na Figura 29.

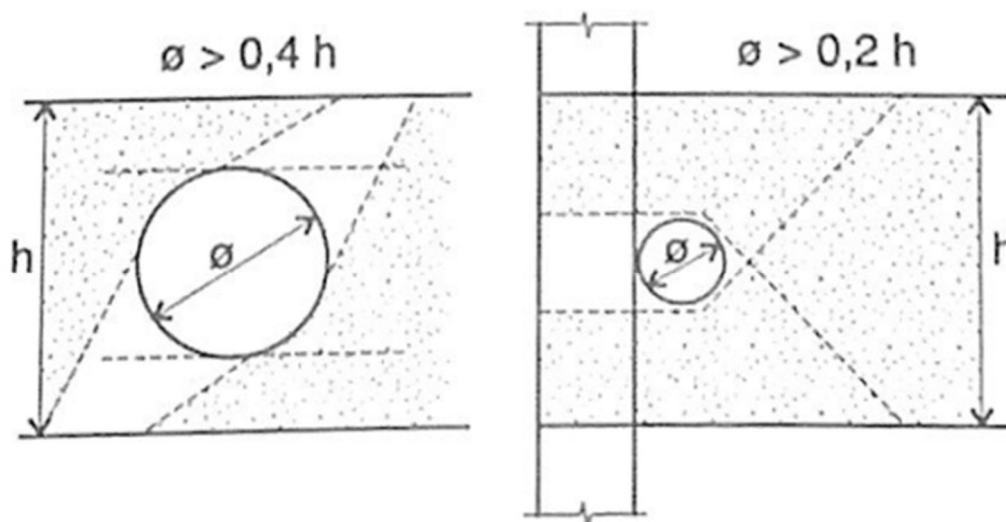
Figura 29 – Critérios para dimensionamentos de grandes aberturas.



Fonte: Fusco (1995).

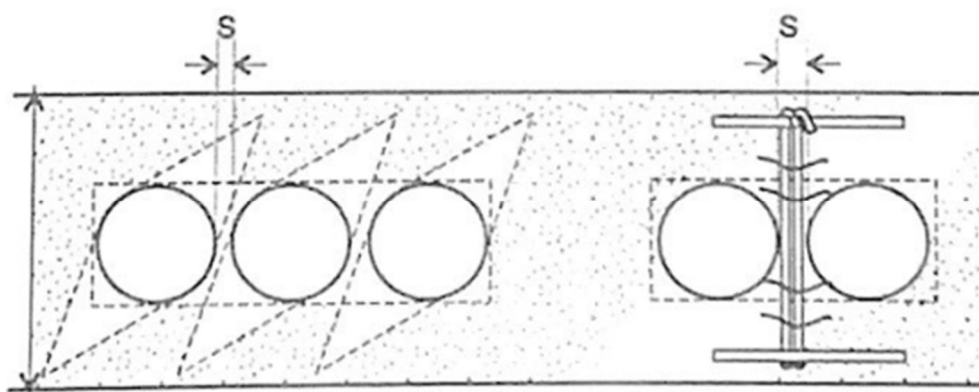
Quando as aberturas estão em posições críticas ou quando há várias aberturas próximas umas das outras, é necessário abordar o problema como se fosse uma abertura de grande dimensão, como é apresentado na Figura 30. Deve-se ter cuidado para evitar uma fissuração excessiva nas partes consideradas como não resistentes. Tal situação é observada na Figura 31 onde s é o espaçamento entre faces dos furos.

Figura 30 – Situações duvidosas que devem ser tratadas como se fossem grandes aberturas.



Fonte: Fusco (1995).

Figura 31 – Fissuração das partes consideradas como não resistentes.



Fonte: Fusco (1995).

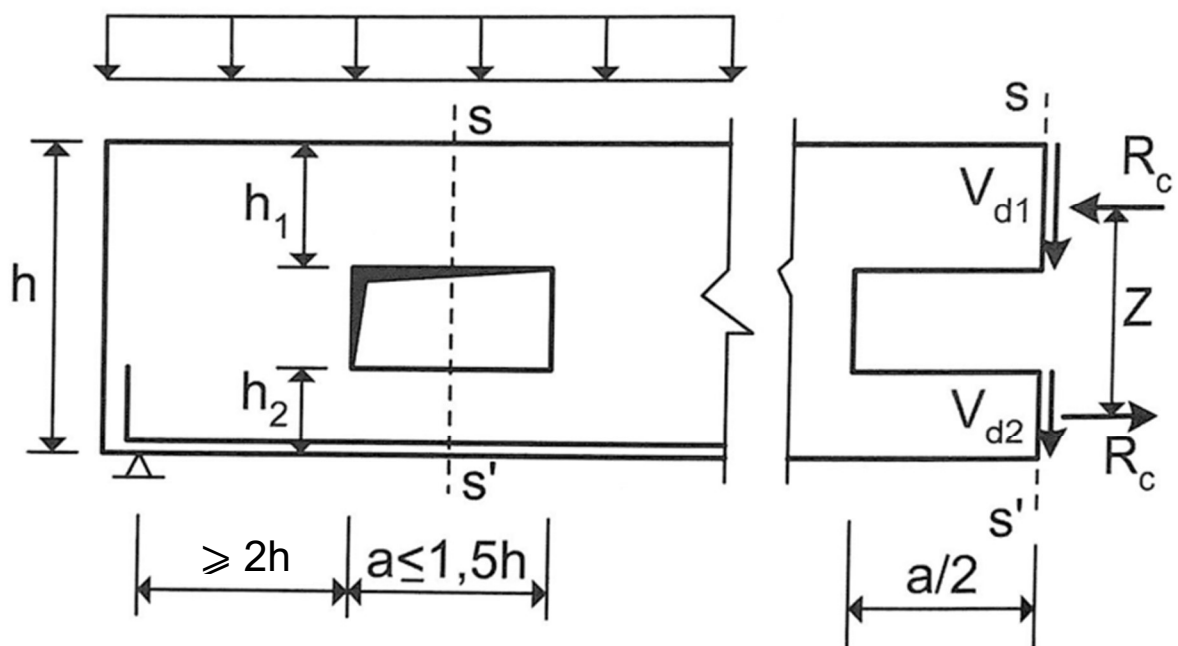
2.5. José Milton Araújo (2014)

José Milton Araújo (2014) comenta que devem ser considerados reforços com o emprego de estribos verticais e barras longitudinais em aberturas transversais nas almas das vigas designadas à passagem de canalizações.

Ademais, é citado que, caso atenda a NBR 6118:2014, ou seja, dependendo do tamanho e da posição dessas aberturas, o reforço das armaduras pode ser prescindido, pois o efeito da abertura na resistência da viga será pequeno.

Por conseguinte, o autor explica como é feito o cálculo do reforço da armadura em uma abertura na alma das vigas. Assim, é apresentada a Figura 32:

Figura 32 – Abertura na alma da viga.



Fonte: Adaptada de Araújo (2014).

É adotado que o momento fletor de cálculo na seção SS' é M_d e o esforço cortante de cálculo é V_d . Além do mais, a distância Z entre os centros geométricos dos banzos é dada por:

$$Z = h - \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) \quad (9)$$

Logo, as forças normais atuantes nos banzos superior e inferior a abertura é igual a:

$$R_c = \frac{M_d}{Z} \quad (10)$$

Como o esforço cortante é distribuído entre os banzos, têm-se que no banzo superior atua o V_{d1} e no inferior, o V_{d2} , dados pelas seguintes expressões:

$$V_{d1} \geq 0,8 * V_d \quad (11)$$

$$V_{d2} \geq 0,2 * V_d \quad (12)$$

E essas forças cortantes provocam momentos na extremidade da abertura, sendo que esses são:

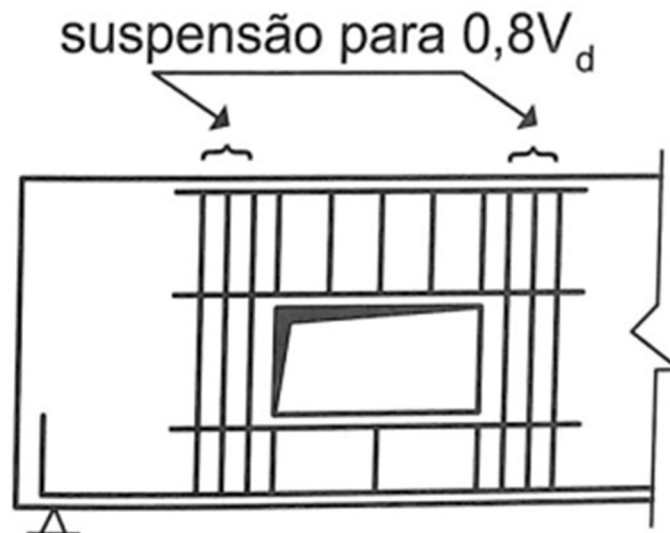
$$M_{d1} \geq V_{d1} * \frac{a}{2} \quad (13)$$

$$M_{d2} \geq V_{d2} * \frac{a}{2} \quad (14)$$

Essa diferenciação se dá porque o banzo superior está comprimido, absorvendo a maior parte do esforço cortante, e o banzo inferior tracionado, atuando no Estádio II. Dessa forma, as armaduras longitudinais são dimensionadas à flexão composta em ambos banzos, sendo o superior flexo-compressão (com R_c e M_{d1}) e o inferior com flexo-tração (com R_c e M_{d2}). E os estribos de reforço são dimensionados para as forças cortantes V_{d1} e V_{d2} .

Araújo (2014) explica que, além dessas armaduras de reforço, é imprescindível considerar uma armadura de suspensão nas faces da abertura, dimensionada para a força $0,8V_d$, como apresentada na Figura 33.

Figura 33 – Reforço nas aberturas da viga.



Fonte: Araújo (2014).

Dessa forma, na Tabela 2 é apresentado um resumo entre os autores estudados e suas dimensões limites para realização dos cálculos das armaduras de reforços dos furos e aberturas.

Tabela 2 - Comparação entre os autores com as dimensões limites para cálculo das armaduras de reforços.

Dimensões limites - Armadura de reforço	Leonhardt e Mönnig (1978)	Süssekind (1984)	Fusco (1995)	Araújo (2014)
Comprimento do furo	$\geq 0,6h$ e $\leq 2h$	$\leq 1,5h$	$\leq 1,5h$	$\leq 1,5h$
Distância entre furos	N.I.	$\geq 1,2h$	N.I.	N.I.
Distância face de apoio	$\geq h$	N.I.	$\geq h$	$\geq 2h$
Distância face da viga	N.I.	≥ 10 cm	N.I.	N.I.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

2.6. Projeto estrutural

O projeto estrutural desempenha um papel fundamental na concepção e construção de edificações. Ele envolve a análise, o dimensionamento e o detalhamento dos elementos estruturais, garantindo sua capacidade de resistir aos esforços solicitantes e atender aos requisitos de segurança, durabilidade e funcionalidade.

Ao elaborar o projeto estrutural de um edifício devem ser considerados todos os projetos da edificação, Fusco (1976) explica que “A síntese estrutural faz parte, na realidade, de um esquema mais amplo de raciocínio, que engloba toda a síntese de projeto da construção”.

Assim, o projeto de uma construção é um sistema integrado, no qual a solução final para cada elemento só é alcançada quando há uma adequação entre as soluções de todos os outros elementos (Fusco, 1976).

Na Figura 34 está apresentada a espiral de projeto geral, sendo que as linhas radiais estabelecem os elementos principais e globais do projeto a depender da tipologia da construção, determinando um caminho seguido de análises que inicia no arranjo geral e finaliza na estrutura.

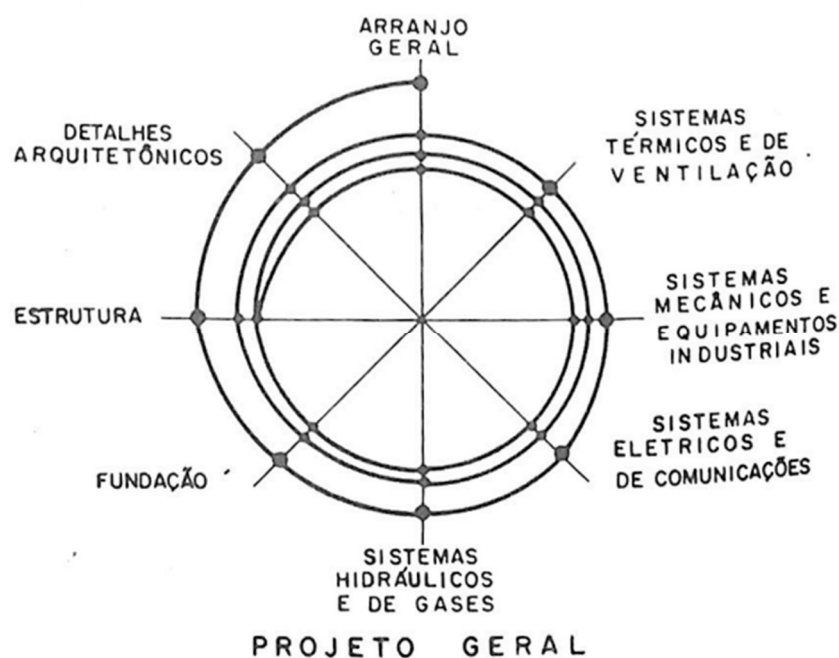


Figura 34 – Espiral de projeto geral.

Fonte: Fusco (1976).

Através dessa espiral, nota-se a presença de projetos dos sistemas térmicos de ventilação, sistemas mecânicos e equipamentos industriais, sistemas elétricos e de comunicações e sistemas hidráulicos e de gases, sendo que todos esses projetos citados podem propiciar em aberturas nos elementos estruturais.

Em primeiro momento, cada projetista realiza, geralmente, um trabalho individual no qual são propostas adequações sobre seus elementos de serviço, com base nos requisitos do proprietário. Assim, nem sempre as determinações individuais podem ser atendidas devido as incompatibilidades entre os projetos. Fusco (1976) explica que o desenvolvimento do projeto visa alcançar uma solução equilibrada, onde todos os resultados estejam em harmonia.

Ademais, a Associação Brasileira dos Gestores e Coordenadores de Projetos - AGESC (2019) define seis fases que são contidas na elaboração de projetos, sendo essas:

- Fase A – Estudo preliminar: realizar a concepção do produto, estabelecendo as restrições e possibilidades do projeto imobiliário. Dentro dessa etapa são feitos levantamento de dados, programa de necessidades e estudo de viabilidade.
- Fase B – Anteprojeto: elaborar o conceito arquitetônico e outros elementos do empreendimento, estabelecendo e consolidando todas as informações necessárias para verificar sua viabilidade em termos físicos, legais e econômicos.
- Fase C – Projeto básico: estabelecer os ambientes, as conexões e demais elementos da edificação, com a comunicação sem conflitos entre todos os sistemas constituintes. Nessa etapa é possível ter uma avaliação preliminar dos custos, métodos de construção e prazos de execução. Fase que são definidos os sistemas prediais.
- Fase D – Projeto executivo: realizar o detalhamento minucioso de todos os elementos do empreendimento e incorporar os detalhes de produção necessários. Fase que os sistemas prediais são consolidados, compatibilizados e dimensionados.

- Fase E – Pós entrega de projetos: assegurar que as informações de projeto sejam completamente compreendidas e utilizadas de forma adequada durante a execução em campo.
- Fase F – Pós entrega da obra: realizar uma análise e avaliação do desempenho da edificação em uso, a fim de verificar e confirmar se as restrições e suposições do projeto foram adequadas.

Portanto, após todas essas fases é possível garantir que o edifício esteja com um ótimo desempenho em todas as áreas comentadas e que atendam as requisições. Logo mais, Fusco (1976) ainda cita sobre esse desempenho

Para a obtenção da máxima eficiência, os componentes da equipe de projeto devem trabalhar harmonicamente, entendendo que as soluções propostas para cada um dos itens de projeto somente serão satisfatórias em função de sua adequação perante os demais itens. Desse modo, as soluções adotadas num ciclo de projeto devem sempre ser passíveis de modificações num ciclo posterior (Fusco, 1976).

2.7. Projeto de furações

De acordo com a Associação Brasileira de Estrutura e Consultoria Estrutural - ABECE (2016), o projeto de furações, também denominado por essa como o procedimento de *mark-up* de instalações, tem como principal objetivo reunir todos os furos especificados por cada especialista em uma única planta, que é aprovada pela equipe de estrutura e se torna o projeto de produção a ser utilizado durante a execução da construção.

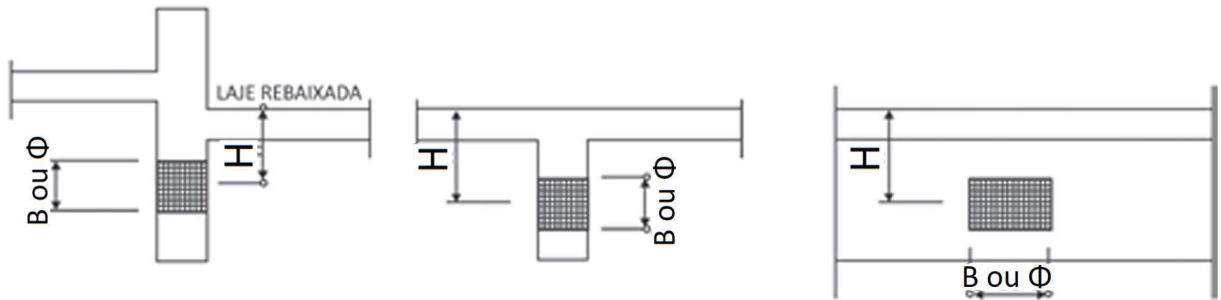
Assim, o projeto de furações é conhecido pelos especialistas também como projeto *mark-up*, porque através dele são feitas as marcações precisas onde se encontram os furos. Assim, ele é utilizado para revisar todas as sobreposições dos sistemas prediais no projeto de estruturas, demarcando com exatidão todos os locais de interferências, para que o projetista estrutural possa autorizar as disposições das furações ou propor novas alternativas.

Ademais, a ABECE (2016) propõe uma sequência para a elaboração do projeto de furações, sendo essa:

- O projetista estrutural registra a prancha contendo a fôrma do pavimento, sem qualquer informação adicional, mantendo as cores e *layers* originais do projeto, a fim de iniciar a sequência de cadastro para os demais projetos complementares;
- Se houver projeto de climatização, exaustão ou pressurização, o responsável deve cadastrar a furação desses em *layer* na cor roxa com todas as suas respectivas cotas;
- O projetista do sistema hidráulico e esgoto deve cadastrar a furação em *layer* na cor azul com suas respectivas cotas;
- O projetista do sistema elétrico e comunicações deve cadastrar a furação em *layer* na cor verde com suas respectivas cotas;
- Em seguida, o projetista da arquitetura, que atualmente pode ser o responsável pela compatibilização de projetos, verifica todos os furos e aberturas e deve cadastrar as furações restantes em *layer* na cor laranja com suas respectivas cotas;
- Assim, o projetista estrutural deve averiguar os furos, sendo esses aprovados ou com observações de mudanças para se adequarem ao projeto estrutural;
- Logo, os projetistas dos sistemas com furações devem revisar as propostas do projetista estrutural;
- Seguindo, o responsável pela compatibilização verifica se foram atendidas as propostas, se os furos foram alterados conforme solicitações e, por fim, realiza seus comentários ou aprova o projeto;
- Finalmente, o projetista estrutural analisa todos os furos com as alterações requisitadas e, geralmente, aprova o projeto *mark-up*;
- Assim, o projeto de furações pode ser liberado para a execução na obra.

A ABECE ilustra, através da Figura 35, uma recomendação da apresentação dos furos no projeto de furações (projeto *mark-up*). É imprescindível a colocação das distâncias dos furos com os elementos estruturais e suas dimensões.

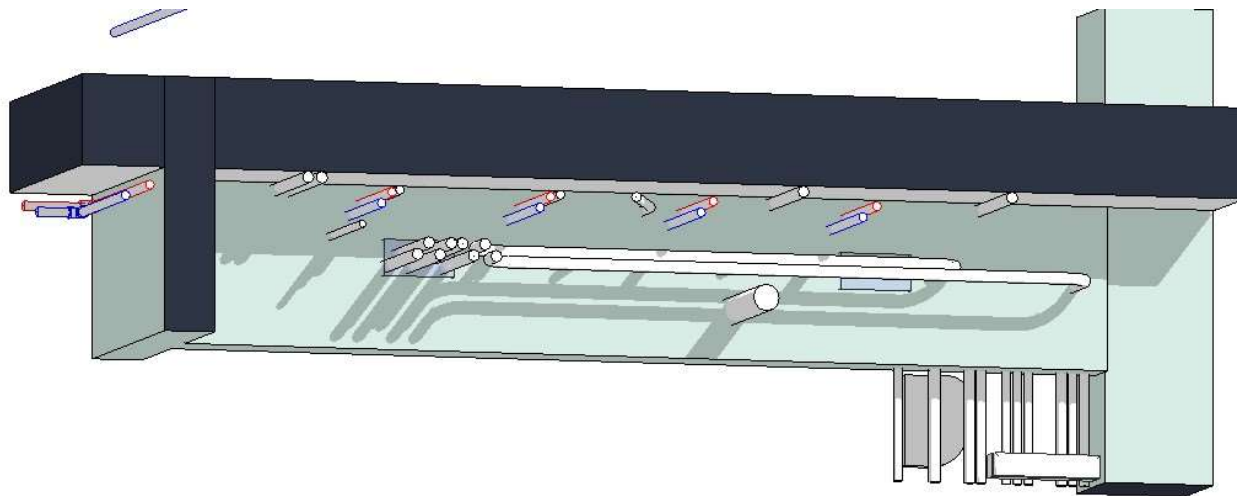
Figura 35 – Recomendação da apresentação da furação.



Fonte: Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (2016).

Na Figura 36 é apresentada uma compatibilização do projeto de furações com o projeto estrutural, por meio de um programa com visualização 3D, onde uma viga se encontra com furos horizontais transversais. Através dessa, é notória a necessidade de uma boa compatibilização entre esses projetos.

Figura 36 – Visualização 3D da compatibilização projetos estrutural e de furação.



Fonte: Novelletto (2019).

2.8. Importância da compatibilização de projetos

Motteu e Cnudde (1989, apud. Ávila, 2011) explica que a importância dos projetos é subestimada, e muitas vezes esses são entregues à obra com diversos equívocos e omissões, o que acarreta uma ineficiência significativa durante a execução e pode comprometer as características previamente idealizadas do objeto final. Essa realidade é confirmada pela grande quantidade de problemas estruturais em edifícios que são atribuídos às falhas de projeto.

Assim como os projetos são desvalorizados, a etapa de compatibilizá-los é adjacente. “Com a corrida cada vez mais rápida das construções, os cronogramas e prazos estão sendo mais reduzidos, deixando a compatibilização de lado, por ser um processo de análise minucioso e lento” (Monteiro *et al.*, 2017).

Dessa forma, a instauração do processo de compatibilização é importante para garantir a qualidade, a segurança e a eficiência de uma obra. De acordo com Monteiro *et al.* (2017), a compatibilização de projetos é uma maneira de interação entre os diferentes projetos da construção, com a finalidade de encontrar interferências futuras na execução, sendo assim, o objetivo é extinguir com as interposições dos elementos construtivos ajustando os projetos, reduzir o retrabalho, desperdício de tempo e material. Assim, Ávila (2011) comenta

A compatibilização é ferramenta fundamental no processo de desenvolvimento dos projetos, detectando e eliminando problemas ainda na fase de concepção, reduzindo retrabalhos, o custo da construção e prazos de execução, qualificando o empreendimento e aumentando sua competitividade frente ao mercado (Ávila, 2011).

Picchi (1993, apud. Monteiro *et al.* Picchi, 2017), afirma que a prática de compatibilização de projetos consiste em identificar conflitos por meio da sobreposição de diferentes projetos e em promover reuniões entre os responsáveis pelo projeto e pela coordenação, a fim de solucionar quaisquer discrepâncias encontradas.

Logo mais, a importância da compatibilização de projetos se dá por diversos motivos. Como citado anteriormente, auxilia na garantia que a obra seja executada de forma segura e que atenda a todos os requisitos legais e normativos. Visto que, uma vez que os projetos são analisados e ajustados, é possível detectar e corrigir possíveis conflitos ou inconsistências entre eles, como, por exemplo, incompatibilidades entre as instalações elétricas, hidráulicas, entre outras.

Além disso, a compatibilização de projetos ajuda a evitar atrasos e desperdícios de recursos na obra, já que problemas identificados durante a fase de construção podem gerar custos adicionais e atrasos na entrega da obra. Outra vantagem da compatibilização de projetos é a melhoria da qualidade final da obra. Isso porque, ao

ajustar e integrar os projetos, é possível otimizar o desempenho da edificação ou estrutura, garantindo uma melhor funcionalidade e conforto para os usuários.

Farina (2022) comenta que através da integração de todos os projetos, a realização de furos nas estruturas se torna um processo crítico que requer muita atenção e desempenha um papel fundamental na execução conforme o planejado. A inserção de furos ocorre devido a passagem dos sistemas prediais pela estrutura e, ao considerar os furos, o projetista estrutural precisa complementar o projeto de formas e armações, incorporando reforços e verificando a estabilidade do sistema.

Pode-se dizer que o processo de furação, inserido nas atividades de desenvolvimento dos projetos técnicos das disciplinas, traz muitas chances de erros se a equipe não estiver comprometida e bem coordenada. Podem ser geradas muitas revisões de projeto, provocar atrasos de cronograma ou até mesmo levar a obra a situações de improviso (Farina, 2022).

Essa interação entre os projetos pode ser idealizada através da metodologia *Building Information Modeling* (BIM), que consiste em uma abordagem de compartilhamento de informações ao longo das etapas do ciclo de vida de uma edificação, possibilitando identificar com facilidade incompatibilidades e conflitos entre os elementos componentes da construção, como estrutura, arquitetura, instalações elétricas, mecânicas ou hidráulicas (Lino, Azenha e Lourenço, 2012).

Inclusive, uma plataforma BIM incorpora funcionalidades que automaticamente verificam e identificam possíveis erros, atentando os usuários sobre irregularidades, como conflitos entre componentes, falta de conexões adequadas e outros problemas similares (Papadopoulos *et al.*, 2017).

3. METODOLOGIA

Segundo Prodanov e Freitas (2013), os métodos são o caminho, a forma e o modo de pensamento que se aplica em uma pesquisa, assim como um conjunto de processos e operações mentais empregados na abordagem do estudo.

Dessa forma, foram estudados os diferentes tipos de metodologias de abordagem para enquadrar o presente trabalho, sendo que essas são divididas em: dedutiva, indutiva, hipotético-dedutiva, dialética e fenomenológica.

No método de abordagem dedutivo é analisada uma verdade geral para obter uma afirmação particular. Essa abordagem é muito criticada, "[...] os críticos do método dedutivo argumentam que esse raciocínio se assemelha ao adotado pelos teólogos, que partem de posições dogmáticas" (Prodanov e Freitas, 2013). Análogo a essa linha de raciocínio, o método indutivo investiga uma verdade particular para atingir uma afirmação geral.

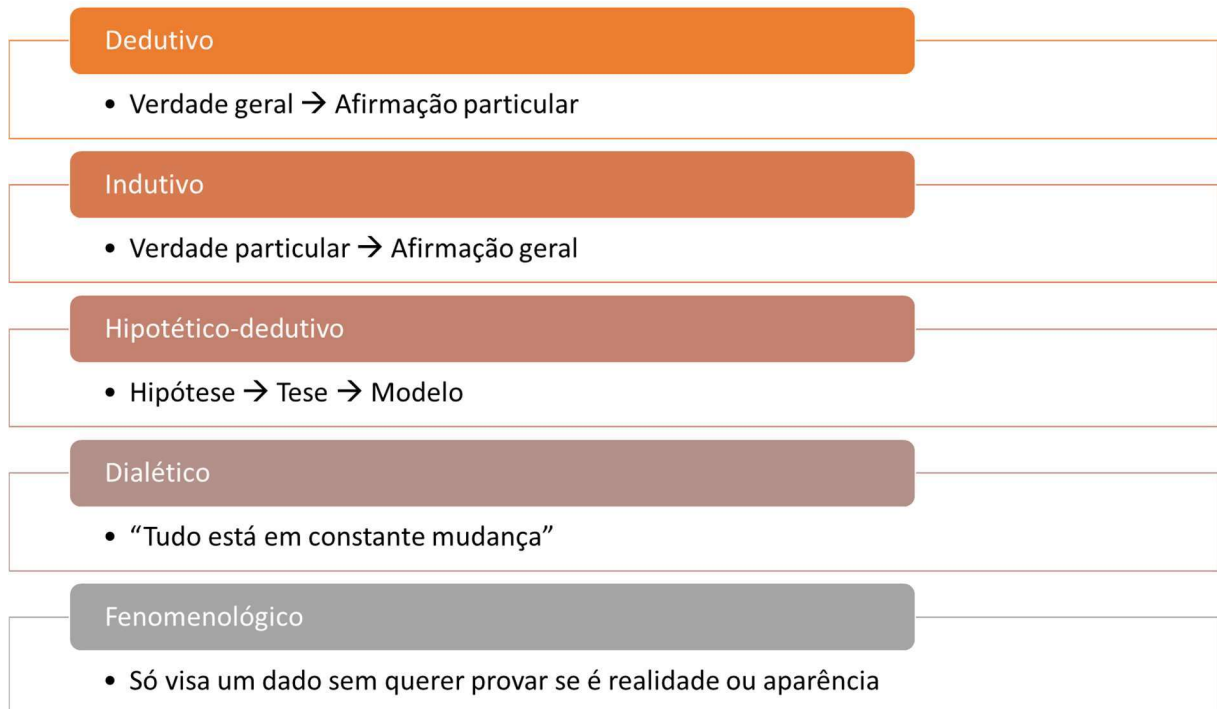
Enquanto os adeptos do método indutivo (empiristas) partem da observação para depois formular as hipóteses, os praticantes do método dedutivo têm como inicial o problema (ou a lacuna) e as hipóteses que serão testadas pela observação e pela experiência (Prodanov e Freitas, 2013).

O método hipotético-dedutivo é baseado em estudar uma hipótese de um problema proposto através de testes e criar um modelo, ou seja, uma nova ideia ou nova teoria. Essa técnica também possui críticas, pois é duvidoso o fato de as hipóteses nunca serem tratadas como absolutamente verdadeiras; quando são confirmadas, ou sejam, criam um modelo, são apenas soluções temporárias.

No método dialético é determinado que tudo está em constante mudança. Nesse tipo de abordagem, a fim de compreender um fenômeno ou objeto específico, o investigador deve examiná-lo em sua totalidade, considerando todos os seus aspectos, interações e conexões, reconhecendo que o conhecimento não é algo fixo, uma vez que tudo no mundo está em constante transformação. Por fim, no método fenomenológico é estudado um dado sem intenção de provar se ele é uma realidade ou aparência, ou seja, consiste em mostrar o dado estudado e em esclarecer esse dado.

Na Figura 37 é apresentado um fluxograma contendo os diferentes métodos de abordagem conforme detalhado anteriormente, apresentando de forma resumida e facilitada as informações especificadas.

Figura 37 - Fluxograma métodos de abordagem de pesquisa científica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Logo, ao analisar os diferentes métodos científicos de abordagem, concluiu-se que serão utilizados para este trabalho tanto o método dialético como o método fenomenológico. Durante a revisão bibliográfica, notou-se que os estudos sobre o tema demonstraram mudanças ao longo das décadas e essa verdade é evidente na engenharia civil, ademais, serão apresentados dados no decorrer da dissertação e esses serão esclarecidos.

Além disso, o método de procedimento, ou seja, o processo técnico a ser seguido dentro deste trabalho será o método comparativo que “[...] ocupa-se da explicação dos fenômenos e permite analisar o dado concreto” (Prodanov e Freitas, 2013).

Logo, o procedimento metodológico é o estudo das referências bibliográficas e, através do conhecimento adquirido dessas, dimensionar e detalhar uma viga de concreto armado com furação horizontal transversal, que foi anteriormente analisada, dimensionada e detalhada em escritório de projetos estruturais, sendo que os projetos

e informações sobre o edifício e o elemento estrutural foram cedidos pelo engenheiro civil Michel Henrique da Silveira.

Como a peça a ser estudada já foi dimensionada com os carregamentos do edifício, considerando todos os coeficientes de segurança como determinado na norma NBR 6118:2023, será realizado o dimensionamento da área de aço necessária para essa viga conforme os autores Carvalho e Filho (2016) e o dimensionamento da área de aço de reforço no furo horizontal conforme a bibliografia Sússekind (1984). Ainda mais, essa peça também será analisada por meio de um programa computacional, bastante utilizado em escritórios de projetos estruturais, TQS.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Características do edifício

Após investigações de vigas de concreto armado com furos e aberturas em edifícios analisados em um escritório de projetos estruturais, o elemento estrutural escolhido é pertencente a um prédio situado no bairro Parque Amazônia, na cidade de Goiânia, no estado de Goiás.

O edifício referido é residencial com quatro a seis apartamentos, de 48 a 117 m², por pavimento. Ao total, o prédio constitui-se em 42 níveis de lajes, com dois subsolos, três pavimentos de garagens, um *hall* de entrada no nível térreo, 33 pavimentos tipos diferenciados, um espaço de lazer no *rooftop* e pavimentos do barrilete e do reservatório.

Outrossim, a área do terreno original desse prédio é igual a 1.659,70 m², sendo que após sua construção tem-se uma área total construída de 23.733,38 m², onde 31,17% dessa área é permeável, ou seja, 517,33 m².

4.2. Projeto estrutural em análise

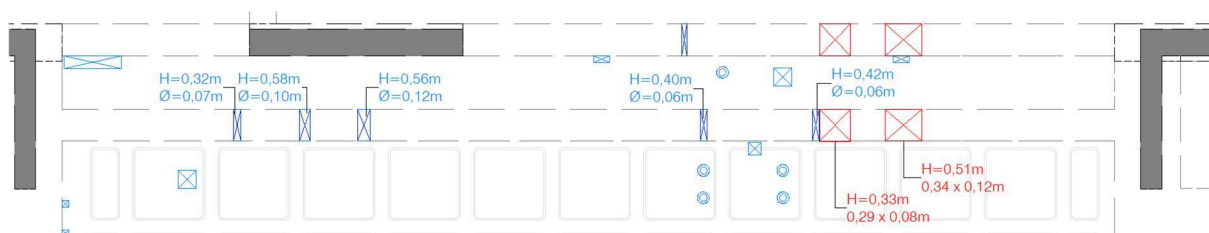
Em concordância com o explicitado em ademão o projeto estrutural compreende toda a análise prévia do projeto arquitetônico do edifício, a concepção estrutural, a análise, o dimensionamento e o detalhamento dos elementos estruturais componentes do sistema. Dessa forma, todos esses itens foram realizados pelo engenheiro civil responsável pelo projeto estrutural do edifício.

Em relação ao projeto estrutural, foi determinado que o edifício se encontra na Classe de Agressividade Ambiental II (agressividade: moderada; classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto: urbana; risco de deterioração da estrutura: pequeno), logo, conforme a NBR 6118 a resistência característica do concreto (f_{ck}) para essa classe deve ser maior ou igual a C25 (25 MPa).

Sobre esse prédio, é interessante citar que o engenheiro especificou, para uma maior economia, uma mudança de f_{ck} a partir do décimo quarto pavimento tipo, sendo que abaixo desse o f_{ck} usado é 40MPa e acima, 30MPa.

Além disso, como foi explicado anteriormente, é necessário que ocorra uma compatibilização do projeto estrutural com o projeto de furações e esse edifício é um exemplo no qual isso essa sugestão é realizada. Na Figura 38 é apresentado o projeto *mark-up* com foco na viga a ser estudada.

Figura 38 – Projeto de furação com ênfase na viga estudada.



Cedida para a autora.

É perceptível que as furações são indicadas em diferentes cores para identificação do tipo de tubulação que está atravessando essa viga, nesse caso, as furações nas cores azuis são para instalações hidráulicas, enquanto a cor vermelha foi adotada para instalações elétricas. No Anexo A está disponibilizado mais informações sobre os furos indicados na imagem anterior.

Logo mais, para esse trabalho, foi realizada uma entrevista com o especialista engenheiro civil Michel Henrique da Silveira, que trabalha com projetos estruturais de concreto armado a aproximadamente 30 anos para, praticamente, todo o território brasileiro, assim, foi questionado sobre o passo a passo desejado na etapa dos projetos com o objetivo de minimizar ao máximo irregularidades referentes à furação das vigas em obras.

O especialista informou que para alcançar esse propósito devem ser seguidas três fases após a contratação do serviço, sendo essas:

- Prévia estrutural;
- Projeto *mark-up* ou projeto de furações;
- Ajuste estrutural.

Portanto, inicialmente, os projetistas estruturais enviam uma prévia do projeto estrutural do edifício em estudo, sendo que nessa etapa já foi feito o lançamento estrutural de acordo com o projeto arquitetônico anteriormente encaminhado. Esse projeto preliminar pode ser detalhado no programa computacional que cada

profissional utiliza, no caso do engenheiro estrutural entrevistado é o TQS em conjunto com os programas da *Autodesk*.

Em seguida, o responsável pela compatibilização de projetos verifica a prévia estrutural com o projeto *mark-up*, no qual contém as furações para instalações hidráulicas, elétricas, ar-condicionado, exaustão e pressurização. Através dessa averiguação, demarca-se as alterações, encaminhando-as ao projetista estrutural.

Por fim, o ajuste estrutural é realizado pelos projetistas estruturais responsáveis, conforme a verificação da etapa anterior, e o projeto pode ser autorizado para a execução.

Caso esse modelo seja seguido, não haverá anomalias durante a obra. Entretanto, existem situações que os furos são implementados no decorrer da construção e existem casos que o projetista estrutural nem é questionado sobre a autorização para alteração no elemento estrutural.

4.3. Viga V22

4.3.1. Apresentação da viga

A viga escolhida para análise fica localizada no apartamento com numeração 2, no projeto arquitetônico, do primeiro pavimento tipo do edifício descrito anteriormente. Devido a sua disposição e função, ela pode ser considerada uma viga transversina, visto que está ligada transversalmente à duas vigas de transição.

A peça estrutural tem 10,30 metros (m) de vão teórico e 9,88 metros (m) de vão livre com seção transversalmente 30x70 centímetros quadrados (cm²), dispõe de sete furos horizontais transversais que se distribuem ao longo de todo o comprimento, que são utilizados para passagem de instalações hidrossanitárias e elétricas.

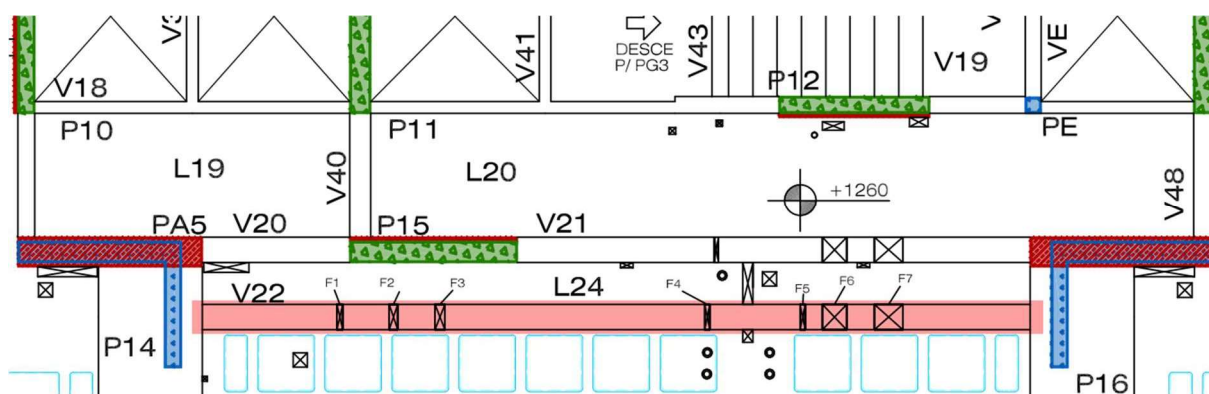
Esse elemento foi inicialmente dimensionado por um engenheiro projetista de concreto armado por meio do programa de análise estrutural TQS, assim, na Figura 39 é apresentada a viga detalhada.

A tabela de ferros dessa viga se encontra no Anexo B.

Logo mais, a viga estudada se encontra entre uma laje nervurada e uma laje maciça, nas proximidades da caixa de elevadores e escada de emergência. Na Figura 40 é apresentado um recorte da planta de fôrmas, na qual foram ocultadas algumas informações, do primeiro pavimento tipo, e o elemento estrutural em análise está em destaque.

Nota-se que os furos dispostos nessa viga estão nomeados de F1 a F7 e foram inseridos com base no projeto de furação ou projeto *mark-up*, conforme citado anteriormente.

Figura 40 – Planta de formas com alteração.

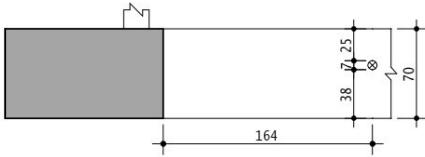
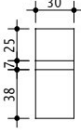
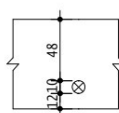
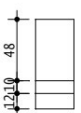
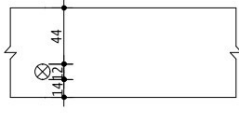
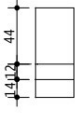
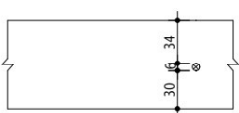
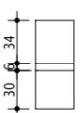
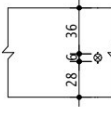
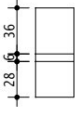
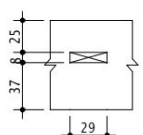
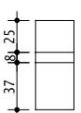
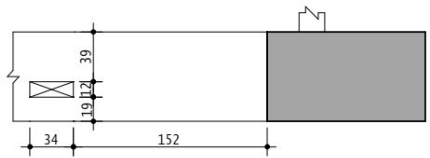
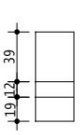


Cedida para a autora.

Portanto, as dimensões e alturas dos furos (a partir da face superior da viga a face inferior do furo) determinadas no projeto *mark-up* são apresentadas na Figura 41, juntamente com o detalhe da seção transversal da viga onde está o furo.

Existem diferenças dessas informações para as adotadas no projeto estrutural devido a margem de segurança que é adotada para essas furações, assim, para todos os furos é determinado um centímetro adicional em cada direção e, logo, a altura é regulada a fim do eixo do furo do projeto estrutural condizer com a altura do eixo do projeto de furação.

Figura 41 – Detalhes furação projeto markup.

FURO	DETALHE	SEÇÃO TRANSVERSAL
F1		
F2		
F3		
F4		
F5		
F6		
F7		

Cotas em centímetros (cm).
Desenho sem escala.

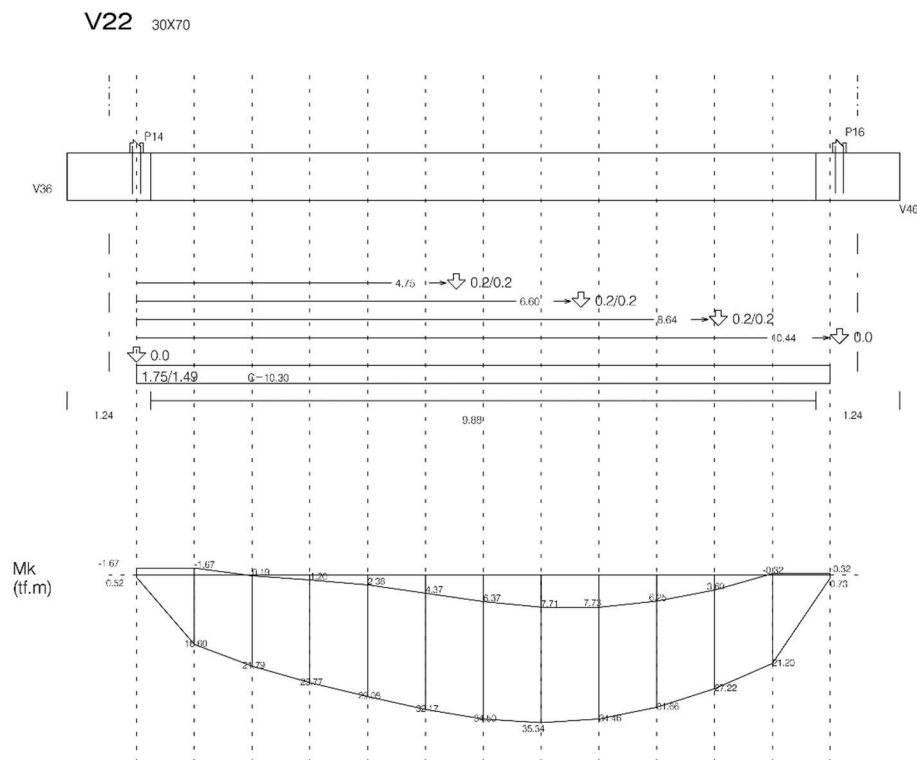
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

4.3.2. Esforços atuantes

Por meio do programa TQS é possível obter todas as informações necessárias para o cálculo da viga e sua análise, entre essas: as cargas concentradas e distribuídas na viga, os diagramas de momento fletor, esforço cortante, esforço normal e momento torsor, as reações nos apoios e flecha considerando a deformação lenta. Além disso, para a concepção dos diagramas o TQS realiza combinações de todos os casos de carregamentos simples, sendo que para esse edifício foram determinados 17 casos de carregamentos simples e 244 combinações.

Inicialmente, por meio da Figura 42 é possível determinar as cargas aplicadas sobre a viga tanto concentradas quanto distribuída, sendo que as cargas concentradas são resultantes de paredes de alvenaria perpendiculares a essa viga. Nessa figura também é notório a envoltória do diagrama do momento fletor, no qual o programa estabeleceu os menores e maiores valores para todos os casos e combinações pré-estabelecidos, ou seja, a envoltória do diagrama de momento fletor. A unidade utilizada para momento fletor pelo engenheiro projetista é tonelada-força vezes metro (tf.m).

Figura 42 – Representação das cargas e diagrama de momento fletor (tf.m).



Cedida para a autora.

4.3.3.1. Vão efetivo

Inicialmente, para determinação do vão teórico, também conhecido como vão efetivo, e verificação da adoção pelo programa, foi feita a verificação com o item 14.6.2.4 da NBR 6118:2023:

$$L = L_0 + a_1 + a_2 \quad (15)$$

Sendo que: L_0 : = *vão livre*;

a_1 : = *comprimento do primeiro apoio*;

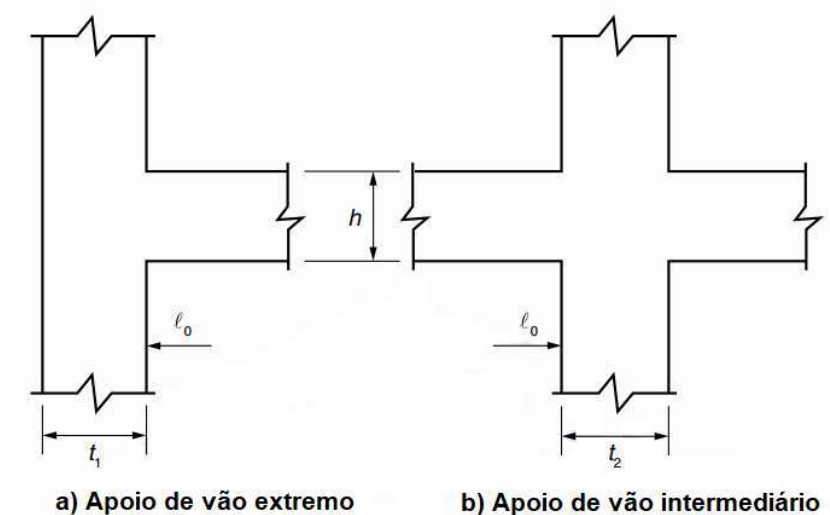
a_2 : = *comprimento do segundo apoio*.

Além disso, o cálculo dos comprimentos dos apoios é realizado pelas seguintes considerações, sendo o resultado igual ao menor valor:

$$a_{1,2} \leq \begin{cases} \frac{t_{1,2}}{2} \\ 0,3 * h \end{cases} \quad (16)$$

Na Figura 44 é apresentada a imagem considerada na norma técnica com as incógnitas da fórmula anterior.

Figura 44 – Vão efetivo da viga.



Fonte: NBR 6118 (2023).

Dessa forma, utilizando as equações (15) e (16) tem-se os seguintes resultados:

$$a_1 = a_2 \leq \begin{cases} \frac{1,24}{2} = 0,62m \\ 0,3 * 1,24 = 0,21m \end{cases}$$

$$L = 9,88 + 0,21 + 0,21 = 10,30 m$$

4.3.3.2. Área de aço à flexão

Para o cálculo de armadura em vigas de seção transversal em forma de “T” foram adotadas as equações da bibliografia Carvalho e Filho (2016). Primeiramente, foi feita a determinação da largura da mesa colaborante, adotando as seguintes fórmulas.

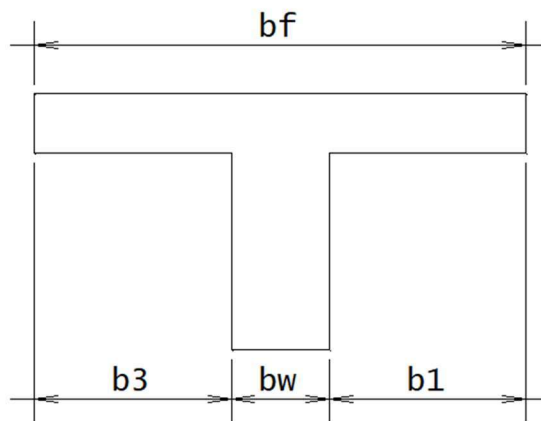
$$b_1 \leq 0,10 * a \quad (17)$$

$$b_3 \leq 0,10 * a \quad (18)$$

$$b_f = b_w + b_1 + b_3 \quad (19)$$

Na Figura 45 estão apresentadas as incógnitas das fórmulas (17), (18) e (19) como determinado pelo autor.

Figura 45 – Largura da mesa colaborante.



Fonte: Adaptação NBR 6118 (2023).

A distância a é calculada em função do comprimento do tramo da viga, sendo essas:

- $a = l$ (viga simplesmente apoiada);
- $a = 0,75 * l$ (tramo com momento em uma só extremidade);
- $a = 0,60 * l$ (tramo com momento nas duas extremidades);

- $a = 2 * l$ (tramo em balanço).

Nesse caso, $a = l = 10,30 \text{ m}$, ou seja, a viga analisada é simplesmente apoiada.

Logo, considerando essa determinação e as fórmulas (17), (18) e (19), obtiveram-se os seguintes valores.

$$b_1 = 0,10 * a = 1,03 \text{ m}$$

$$b_3 = 0,10 * a = 1,03 \text{ m}$$

$$b_f = 0,30 + 1,03 + 1,03 = 2,36 \text{ m}$$

Dessa forma, verificou-se que a determinação da largura colaborante determinada pelo programa está condizente com os cálculos manuais.

Relembrando que os dados adotados previamente, considerando CA50 e $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$, tem-se as informações abaixo para o pior caso, ou seja, onde o momento fletor é maior.

$$M_d = 353,4 * 1,4 = 494,8 \text{ kNm} \quad (20)$$

$$f_{cd} = \frac{40000}{1,4} = 28571,4 \text{ kN/m}^2 \quad (21)$$

Adotando a viga com seção retangular, será calculada a forma adimensional de M_d : KMD.

$$KMD = \frac{M_d}{(b_{cs} * d^2 * f_{cd})} = 0,0168 \quad (22)$$

Assim, através dos valores calculados e considerando o Quadro 3.1 do Carvalho e Filho (2016), Anexo E deste trabalho, são determinados os seguintes.

$$k_x = 0,025; k_z = 0,99; \varepsilon_c = 0,257\text{‰}; \varepsilon_s = 10,0\text{‰}$$

A seguir, será realizado o cálculo da armadura a fim de comparação com os dados obtidos pelo programa usado.

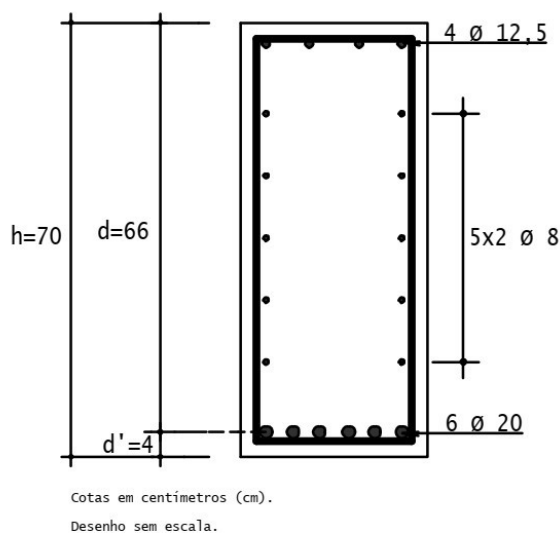
$$f_s = \frac{50}{1,15} = 43,5 \text{ kN/m}^2 \quad (23)$$

$$A_s = \frac{M_d}{(kz * d * f_s)} = 17,4 \text{ cm}^2 \quad (24)$$

É notório que o resultado obtido para a área de aço condiz com o valor informado no relatório do Anexo C, ou seja, é concordante com o programa.

Na Figura 46 é apresentado o detalhamento da área de aço dessa viga, como calculado, sendo também informado os valores da altura (h), a altura útil (d) e a distância d'.

Figura 46 – Detalhamento seção retangular V22.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

4.3.3.3. Altura da linha neutra

Na etapa anterior foi considerada uma viga retangular para o cálculo do KMD. Dessa forma, adotando a seção determinada, tem-se $b_w = b_f$. Nesse caso, supõe-se que a linha neutra passe na mesa da viga. Calculando a altura da linha neutra com os dados obtidos em antemão:

$$x = kx * d = 1,65 \text{ cm} \quad (25)$$

Visto que a altura da mesa colaborante é 5 cm, logo $x < h_f$. Dessa forma, é possível afirmar que a hipótese adotada é válida, ou seja, a linha neutra está na mesa e a seção é retangular.

O resultado encontrado para a altura da linha neutra é condizente com o dado de saída do programa TQS.

Logo abaixo, na Tabela 3 são apresentadas as alturas da linha neutra em cada furação da viga, assim como os momentos fletores e esforços cortantes máximos.

Tabela 3 – Determinações furos, esforços característicos e altura da linha neutra.

	Furos						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Momentos Fletores Característicos (tf.m)	22,41	25,38	27,58	35,11	33,13	31,50	28,17
Momentos Fletores Característicos (kN.m)	224,08	253,76	275,82	351,08	331,28	315,05	281,68
Esforços Cortantes Característicos (tf)	6,51	5,51	4,57	1,75	4,06	5,08	7,20
Esforços Cortantes Característicos (kN)	65,12	55,13	45,70	17,48	40,57	50,79	71,98
Linha Neutra (cm)	1,04	1,18	1,29	1,64	1,55	1,47	1,32

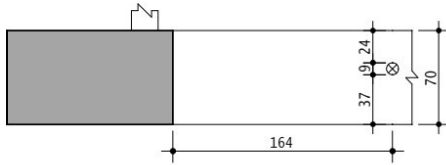
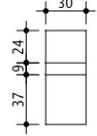
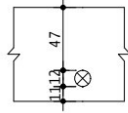
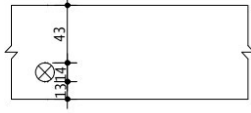
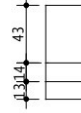
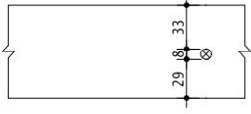
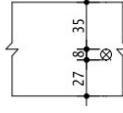
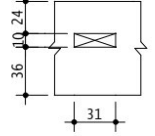
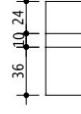
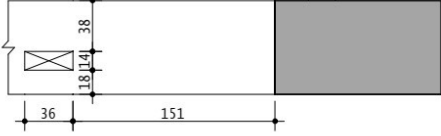
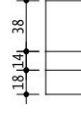
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os esforços são apresentados em duas unidades de medidas a fim de melhor entendimento, visto que o programa TQS gera os valores em tonelada-força metro (tf.m) e tonelada-força (tf), enquanto os cálculos serão realizados com as unidades de medidas do Sistema Internacional (S.I.): quilonewton metro (kN.m) e quilonewton (kN).

4.4. Análise e cálculo da furação

Anteriormente foram informados os valores do projeto de furações para os furos a serem analisados, a seguir na Figura 47 serão listados os mesmos com as cotas do projeto estrutural, levando esses dados em consideração para os próximos cálculos. Nessa indicação, informa-se as dimensões e a altura (a partir da face superior da viga a face inferior do furo) dos furos.

Figura 47 – Detalhes furação projeto estrutural.

FURO	DETALHE	SEÇÃO TRANSVERSAL
F1		
F2		
F3		
F4		
F5		
F6		
F7		

Cotas em centímetros (cm).
Desenho sem escala.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Dessa forma, na Tabela 4 são apresentadas as condições para dispensa de verificação, de acordo com a norma técnica NBR 6118:2023, aplicadas aos furos em

análise. Relembrando que um furo não é verificado apenas quando atender a todas as condições concomitantemente.

Tabela 4 – Verificação das condições limites NBR 6118:2023.

Condições	Furos						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Furos em zona de tração e a uma distância da face do apoio de no mínimo 2.h, onde h é a altura da viga	X	X	X	X	X	X	X
Dimensão do furo de no máximo 12 cm e h/3	X	X		X	X		
Distância entre faces de furos, em um mesmo tramo, de no mínimo 2.h							
Cobrimentos suficientes e não seccionamento das armaduras	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

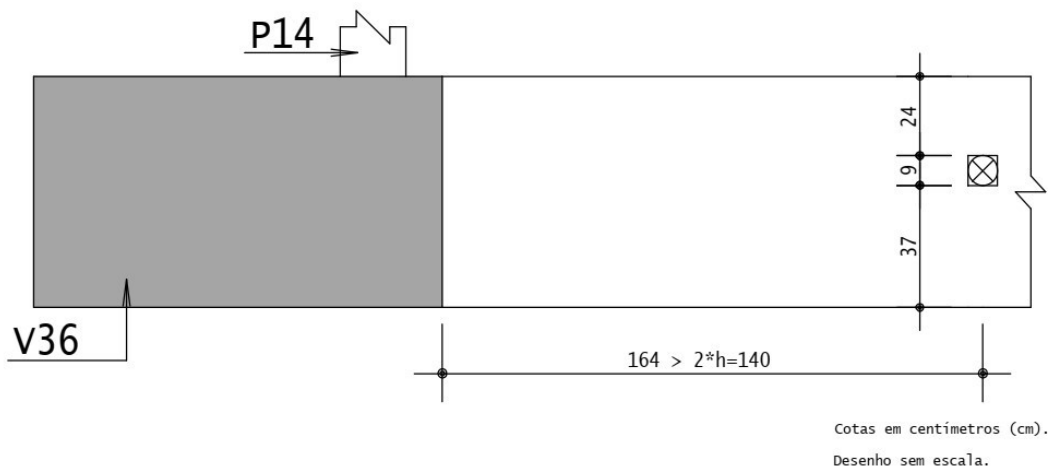
Dessa forma, como nenhum dos furos satisfaz simultaneamente as condições estabelecidas pela norma para dispensa de verificação, cada furo será analisado individualmente ou em conjunto, como ademais explicado.

4.4.1. Furo F1

Primeiramente, não é possível dispensar a verificação do furo F1, devido à proximidade desse com o furo F2, assim, por meio do método Sússekind, serão realizados os cálculos para a armadura de reforço.

Na Figura 48 é apresentado o furo F1, suas dimensões e sua distância à face do apoio. Além do mais, para realizar os cálculos em conformidade com o autor selecionado, foi feito um quadrado circunscrito com o mesmo diâmetro do furo circular.

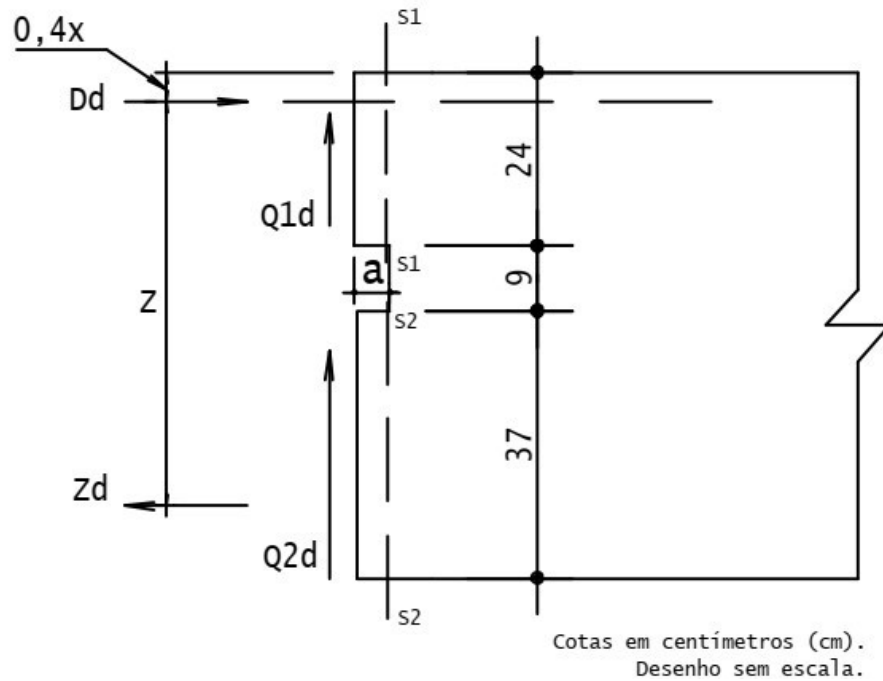
Figura 48 – Representação do furo F1.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Na Figura 49 são apresentadas as seções a serem trabalhadas para o furo F1, sendo essas seções S₁- S₁ e S₂- S₂, como é determinado no método Sússekind.

Figura 49 – Esforços para dimensionamento das seções S₁-S₁ e S₂-S₂ do furo F1.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Adotando o cortante de 65,12 kN e carga distribuída de 17,5 kN, têm-se os seguintes resultados para os momentos nas seções.

$$M_{1d} = Q_d * a + q_d * \frac{a^2}{2} \quad (26)$$

$$M_{1d} = (65,12 * 1,4) * \frac{0,09}{2} + (17,5 * 1,4) * \frac{0,045^2}{2} = 4,13 \text{ kN.m}$$

$$M_{2d} = 0,1 * Q_d * a \quad (27)$$

$$M_{2d} = 0,1 * (65,12 * 1,4) * \frac{0,09}{2} = 0,41 \text{ kN.m}$$

Para a consideração da aplicação do esforço normal de compressão tem-se 0,4 vezes a altura da linha neutra.

$$0,4 * x \cong 0,4 * 1,04 \cong 0,42 \text{ cm} \quad (28)$$

Enquanto a aplicação do esforço normal de tração se dá no d', sendo esse igual a 4 cm (cobrimento de 2,5 cm somado ao diâmetro do estribo, 0,5 cm, e metade do

diâmetro da armadura positiva, 1,0 cm). Portanto, tem-se o seguinte valor para os esforços normais.

$$D_d = Z_d = \frac{M_d}{z} \quad (29)$$

$$D_d = Z_d = \frac{314}{(0,70 - 0,0042 - 0,04)} = 478 \text{ kN}$$

Assim, para redução aos eixos das seções, têm-se os seguintes valores.

$$M_{S1d} = M_{1d} + D_d * e_1 \quad (30)$$

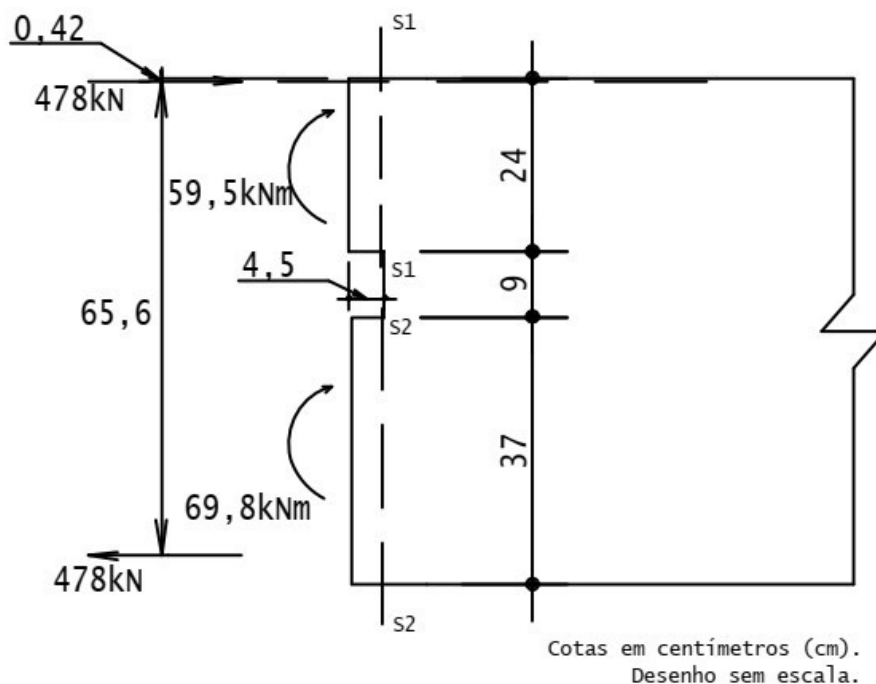
$$M_{S1d} = 4,13 + 478 * \left(\frac{0,24}{2} - 0,0042 \right) = 59,5 \text{ kNm}$$

$$M_{S2d} = M_{2d} + Z_d * e_2 \quad (31)$$

$$M_{S2d} = 0,41 + 478 * \left(\frac{0,37}{2} - 0,04 \right) = 69,8 \text{ kNm}$$

Na Figura 50 é ilustrado o furo F1 com os esforços atuantes anteriormente calculados nas seções S₁-S₁ e S₂-S₂.

Figura 50 - Esforços das seções S₁-S₁ e S₂-S₂ do furo F1.

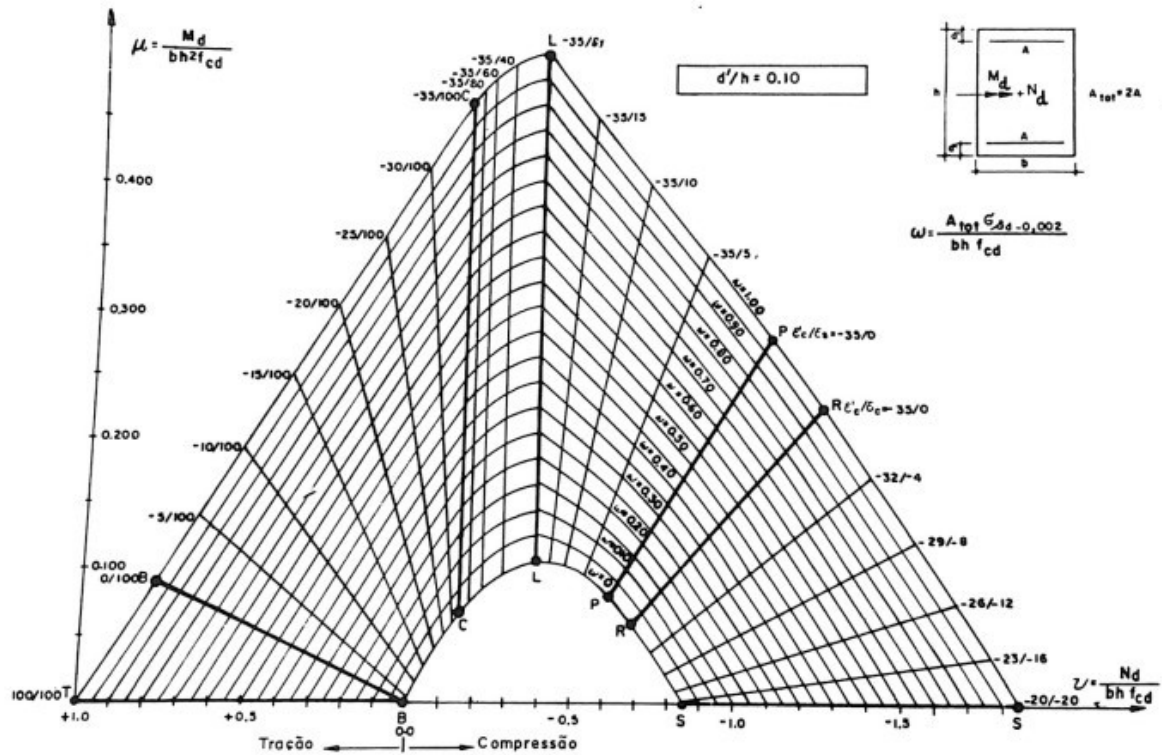


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Por fim, utilizando o ábaco tabela II-11 do Süsskind (1984), apresentado na Figura 51 e que define o coeficiente ω para uma seção retangular submetida à flexão composta reta, são realizados os seguintes cálculos para as seções comprimida e tracionada, ou seja, a seção S₁- S₁ e seção S₂- S₂, respectivamente.

O ábaco também está disponível no Anexo F para melhor visualização.

Figura 51 – Ábaco seção retangular submetida à flexão composta reta.



Fonte: Süsskind (1984).

$$v_{S1} = \frac{N_d}{b * h * f_{cd}} = \frac{478}{0,30 * 0,24 * \frac{40000}{1,4}} = 0,23 \quad (32)$$

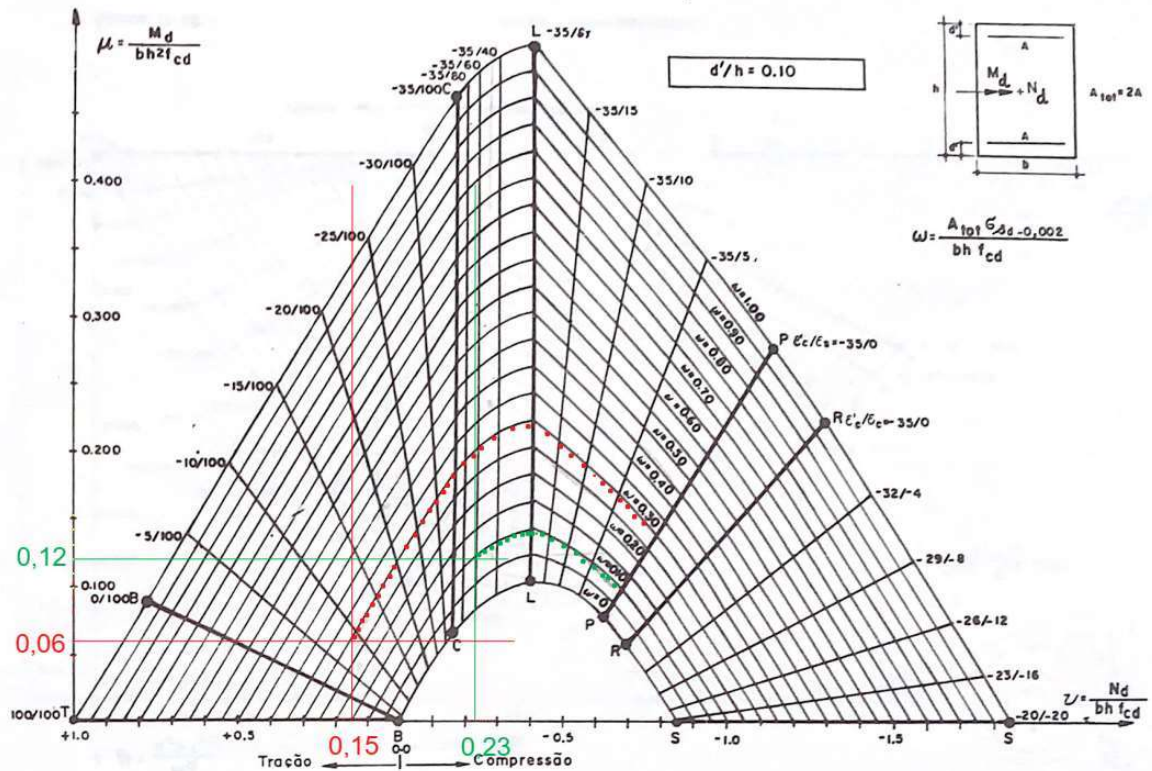
$$\mu_{S1} = \frac{M_{s1d}}{b * h^2 * f_{cd}} = \frac{59,5}{0,30 * 0,24^2 * \frac{40000}{1,4}} = 0,12 \quad (33)$$

$$v_{S2} = \frac{N_d}{b * h * f_{cd}} = \frac{478}{0,30 * 0,37 * \frac{40000}{1,4}} = 0,15 \quad (34)$$

$$\mu_{S2} = \frac{M_{s2d}}{b * h^2 * f_{cd}} = \frac{69,8}{0,30 * 0,37^2 * \frac{40000}{1,4}} = 0,06 \quad (35)$$

Dessa forma, realizando as combinações tem-se que será adotado $\omega = 0,09$ para a compressão e para a tração $\omega = 0,28$. Esses valores foram determinados conforme apresentado na Figura 52.

Figura 52 – Ábaco II-11 com valores calculados.



Fonte: Adaptado de Süsskind (1984).

Inicialmente, calculam-se as áreas mínimas para as seções S₁- S₁ e S₂- S₂ conforme a norma NBR 6118:2023.

$$A_{s,min} = 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 0,004 * A_c \quad (36)$$

Dessa forma, tem-se os seguintes valores:

$$A_{s,min_{S1}} = 1,65 \text{ cm}^2 < 2,88 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min_{S2}} = 1,65 \text{ cm}^2 < 4,44 \text{ cm}^2$$

Portanto, a área mínima de aço é 2,88 cm² para a seção comprimida e 4,40 cm² para a seção tracionada.

A seguir tem-se o seguinte valor de área total para a seção comprimida.

$$A_{total} = \frac{\omega * b * h * f_{cd}}{f_{yd}} \quad (37)$$

$$A_{s,total_{S1}} = \frac{0,09 * 0,30 * 0,24 * \frac{40000}{1,4}}{\frac{500000}{1,15}} = 4,26 * 10^{-4} m^2 = 4,26 cm^2$$

Correspondendo a 2,13 cm² em cada bordo. Dessa forma, na seção comprimida será adotada a área mínima de 2,88 cm². Logo, analisando a área de aço individual do aço, será adotado 3 ϕ 12,5 mm.

Para a seção tracionada terá o seguinte resultado.

$$A_{s,total_{S2}} = \frac{0,28 * 0,30 * 0,37 * \frac{40000}{1,4}}{\frac{500000}{1,15}} = 20,42 * 10^{-4} m^2 = 20,42 cm^2$$

Correspondendo a 10,21 cm² em cada bordo. Será adotado 3 ϕ 20,0 mm.

A seguir, será realizado o dimensionamento da seção S₁-S₁ ao cisalhamento, assim, a seguir é apresentado o cálculo de verificação das tensões de compressão nas bielas do concreto.

$$V_{sd} \leq V_{Rd2,I} = 0,27 * \alpha_{v2} * f_{cd} * b_w * d \quad (38)$$

No qual, $\alpha_{v2} = (1 - \frac{f_{ck}}{250})$ e $V_{Rd2,I}$ é a força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas no modelo I da norma NBR 6118:2023. Adotando a altura útil dessa seção como 20 cm, dessa forma, tem-se o seguinte.

$$V_{sd} = 91,2 kN < V_{Rd ,I} = 0,27 * \left(1 - \frac{40}{250}\right) * \frac{40000}{1,4} * 0,30 * 0,20 = 388,8 kN$$

Como a força cortante resistente da biela comprimida é maior que a força cortante solicitante, não há perigo de esmagamento do concreto das bielas. Portanto, é correto calcular a área de armadura transversal.

Para o cálculo da armadura transversal nas seções S₁-S₁ e S₂-S₂, deve-se determinar a parcela da força cortante a ser absorvida por essa armadura (relembrando que para a seção tracionada é apenas 10% da força cortante total):

$$V_{sw} = V_{sd} - V_c \quad (39)$$

Assim, é necessário primeiramente realizar o cálculo da parcela da força cortante absorvida por mecanismos adicionais ao de treliça (V_c) para determinar a força cortante absorvida pela armadura transversal.

$$V_c = 0,6 * f_{ctd} * b_w * d \quad (40)$$

$$f_{ctd} = 0,15 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (41)$$

Logo, os resultados encontrados são:

$$V_{cS1} = 0,6 * 0,15 * 40^{\frac{2}{3}} * 1000 * 0,30 * 0,20 = 63,2 \text{ kN}$$

$$V_{swS1} = 91,2 - 63,2 = 28 \text{ kN}$$

$$V_{cS2} = 0,6 * 0,15 * 40^{\frac{2}{3}} * 1000 * 0,30 * 0,33 = 104,2 \text{ kN}$$

Logo, o concreto da viga não é capaz de resistir aos esforços de cisalhamento aplicados na seção S₁-S₁ enquanto na seção S₂-S₂ ocorre o oposto.

Assim, faz-se necessário a determinação da área de estribos para seção comprimida, enquanto na seção tracionada será adotada a área mínima. Logo, em ademão será calculada a armadura transversal mínima conforme NBR 6118:2023.

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w * s * \text{sena} \alpha} \geq 0,2 * \frac{f_{ct,m}}{f_{ywk}} \quad (42)$$

Nesse caso, tem-se que: $\rho_{sw} := \text{taxa geométrica};$

$A_{sw} := \text{área da seção transversal dos estribos};$

$b_w := \text{largura média da alma};$

$s := \text{espaçamento dos estribos};$

$\alpha := \text{inclinação dos estribos ao eixo longitudinal da viga};$

$f_{ct,m} = 0,3 * f_{ck}^{2/3} := \text{resistência à tração indireta média};$

$f_{ywk} := \text{resistência característica ao escoamento do aço}.$

Dessa forma, tem-se que $\rho_{sw} \geq 0,001$. Logo, calcula-se a área mínima de armadura transversal por metro com inclinação de 90° .

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min} = \rho_{sw} * b_w * sen\alpha \quad (43)$$

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min} = 4,21 \text{ cm}^2/m$$

Ademais, o cálculo para a armadura transversal em virtude da força cortante absorvida pelo estribo, V_{sw} .

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9 * d * f_{ywd} * (sen\alpha + cos\alpha)} \quad (44)$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{28}{0,9 * 0,20 * \frac{500000}{1,15}} = 3,58 \text{ cm}^2/m$$

Portanto, em ambos os banzos serão adotados o valor referente a armadura mínima. Dessa forma, é recomendado, no mínimo, o uso de ϕ 6,3 mm c/ 7,0 cm. A adoção dessa armação foi feita com base na tabela contida no Anexo G.

A afirmação anterior, ou seja, nessa seção adota a armadura de estribos mínima, pode ser obtida ao calcular a força cortante resistida correspondente à taxa de armadura mínima, por meio da equação (45).

$$V_{RI,\rho min} = 644 * 1,4 * b_w * d * (0,1522 * f_{ck}^{\frac{2}{3}}) \quad (45)$$

$$V_{RI,\rho min} = 644 * 1,4 * 0,30 * 0,20 * \left(0,1522 * 40^{\frac{2}{3}}\right) = 96,30 \text{ kN}$$

Dessa forma, é claro que, devido a força cortante aplicada ser menor que a força cortante resistida correspondente à taxa de armadura mínima, utiliza-se a armadura transversal mínima.

Logo, é necessário verificar se o valor encontrado para o espaçamento condiz com os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 6118:2023. Sendo esses:

$$\begin{cases} s_{m\acute{a}x} \leq 0,6 * d \leq 300 \text{ mm}; \text{ se } V_{sd} \leq 0,67 * V_{Rd2,I} \\ s_{m\acute{a}x} \leq 0,3 * d \leq 200 \text{ mm}; \text{ se } V_{sd} > 0,67 * V_{Rd2,I} \end{cases} \quad (46)$$

Como $V_{sd} = 0,24 * V_{Rd2,I}$, portanto, o valor máximo para o espaçamento é $s_{m\acute{a}x} = 0,6 * 20 = 12 \text{ cm}$. O valor adotado está em conformidade.

Através do método Sssekind, é necessário o cálculo da armadura dos estribos para “suspensão” do cortante, em ambas as laterais do furo, ou seja, a seguir será calculada a armadura de suspensão.

$$A_{sup} = \frac{V_d}{f_{yd}} \quad (47)$$

$$A_{sup} = \frac{91,2}{\frac{500000}{1,15}} = 2,10 * 10^{-4} m^2 = 2,10 \text{ cm}^2$$

Assim, a armadura de suspensão será adotada 3 barras ϕ 10,0 mm.

Para a ancoragem, o comprimento é determinado por meio da equação abaixo.

$$l_b = \frac{\Phi}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \quad (48)$$

Sendo que a resistência de aderência de cálculo (tensão última de aderência) entre a armadura e o concreto é dada pela seguinte fórmula.

$$f_{bd} = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * f_{ctd} \quad (49)$$

Tem-se que: $\eta_1 = 1,0$ para barras lisas (CA25);

$\eta_1 = 1,4$ para barras entalhadas (CA60);

$\eta_1 = 2,25$ para barras alta aderência (CA50);

$\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência;

$\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência;

$\eta_3 = 1,0$ para $\Phi < 32 \text{ mm}$;

$$\eta_3 = \frac{132 - \Phi}{100} \text{ para } \Phi > 32 \text{ mm};$$

$$f_{cta} = \frac{0,21 * \sqrt[3]{f_{ck}^2}}{1,4}.$$

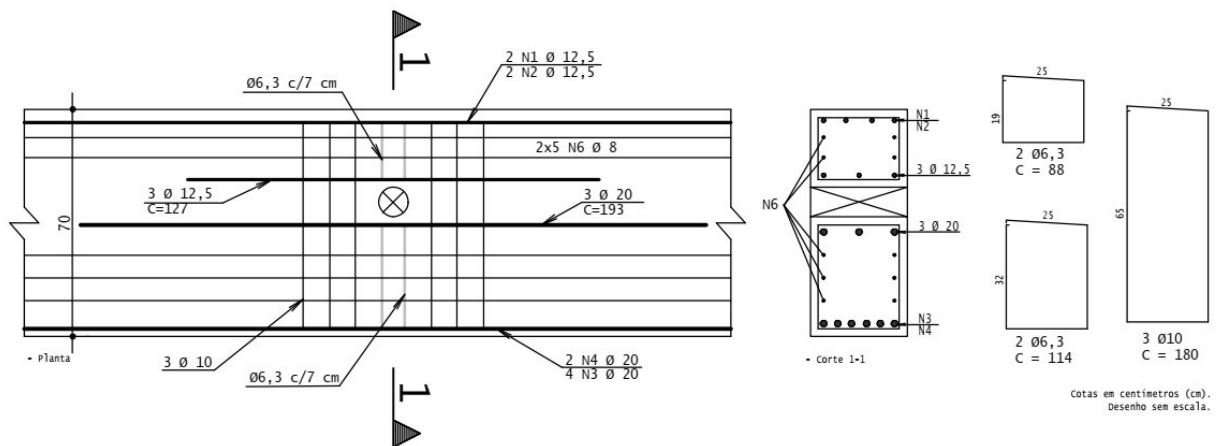
Dessa forma, o resultado encontrado para a ancoragem será 35 cm para a região comprimida e 55 cm para a região tracionada, conforme apresentado na equação (50) resolvida abaixo:

$$l_{b,S1} = \frac{12,5}{4} * \frac{\frac{500}{1,15}}{2,25 * 1,0 * 1,0 * 1,75} = 344 \text{ mm} = 34,4 \text{ cm}$$

$$l_{b,S2} = \frac{20,0}{4} * \frac{\frac{500}{1,15}}{2,25 * 1,0 * 1,0 * 1,75} = 551 \text{ mm} = 55,1 \text{ cm}$$

Por fim, o detalhamento das armaduras calculadas e o corte no eixo do furo são apresentados na Figura 53.

Figura 53 – Detalhe furo F1.



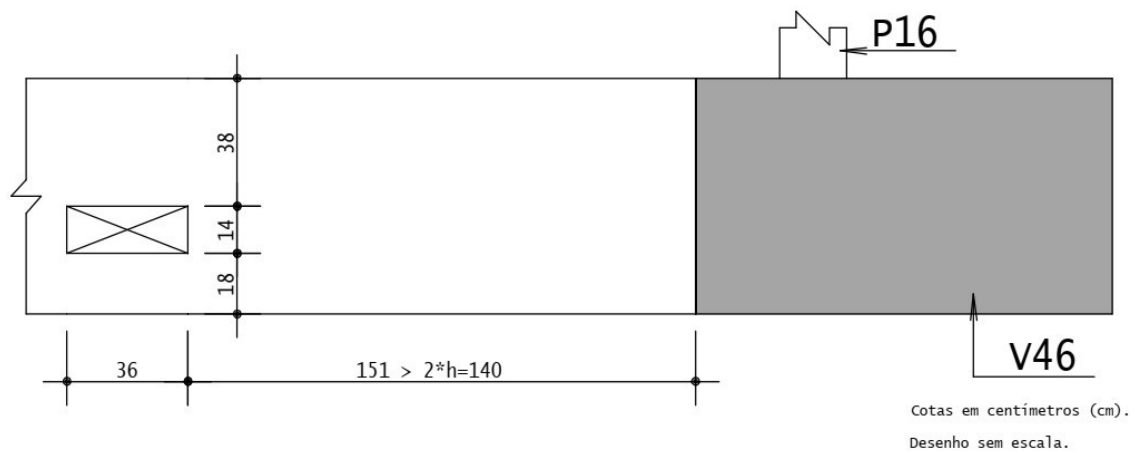
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Ao analisar a furação circular F1, é notório que a determinação da armadura de reforço dos furos F2, F3, F4 e F5 são calculadas com as mesmas equações e determinações, dessa forma, além do cálculo simplificado do furo F1, também é possível encontrar os outros furos no Apêndice A.

4.4.2. Furo F7

Devido o furo F7 ser de seção retangular e inserido mais na seção tracionada comparado ao furo F6, ou seja, é mais próximo a face inferior da viga. Dessa forma, a armação de reforço dessa furação será calculada nesse subitem. Assim, na Figura 54 é apresentado o furo F7, suas dimensões e sua distância à face do apoio.

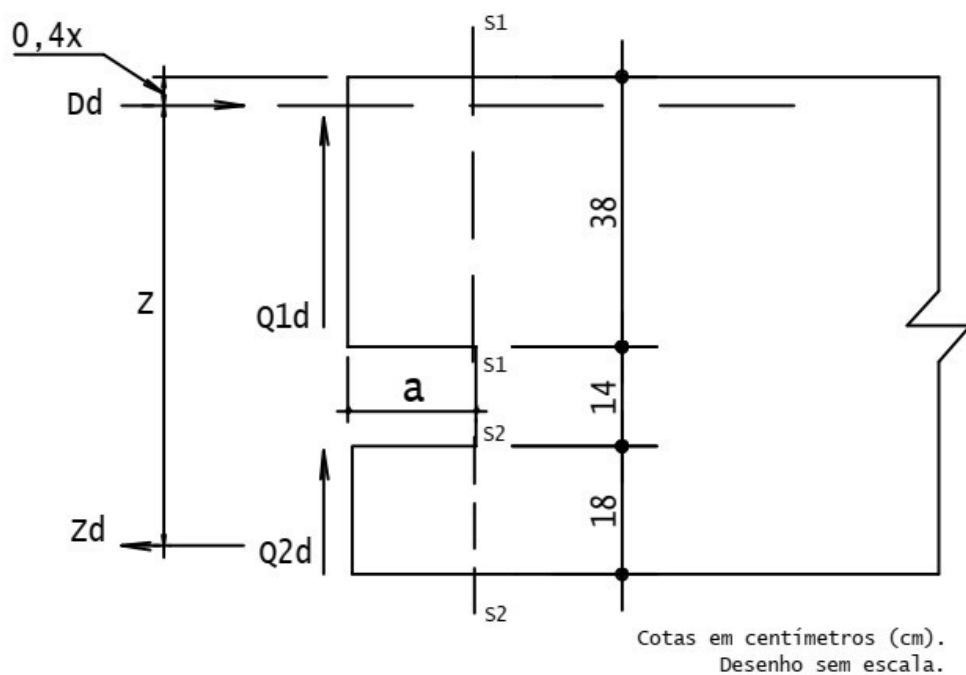
Figura 54 – Representação do furo F7.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Na Figura 55 são apresentadas as seções S₁- S₁ e S₂- S₂ a serem trabalhadas para o furo F7.

Figura 55 – Esforços para dimensionamento das seções S₁-S₁ e S₂-S₂ do furo F7.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Utilizando as equações (26) e (27) e adotando o cortante de 71,98 kN e carga distribuída de 17,5 kN, têm-se os seguintes momentos nas seções.

$$M_{1d} = (71,98 * 1,4) * \frac{0,36}{2} + (17,5 * 1,4) * \frac{0,18^2}{2} = 18,53 \text{ kN.m}$$

$$M_{2d} = 0,1 * (71,98 * 1,4) * \frac{0,09}{2} = 1,81 \text{ kN.m}$$

Logo mais, calcula-se o ponto de aplicação do esforço normal de compressão.

$$0,4 * x \cong 0,4 * 1,32 \cong 0,53 \text{ cm}$$

Em seguida, são calculados os valores para os esforços normais, com o auxílio da equação (29).

$$D_d = Z_d = \frac{394,4}{(0,70 - 0,0053 - 0,04)} = 602,3 \text{ kN}$$

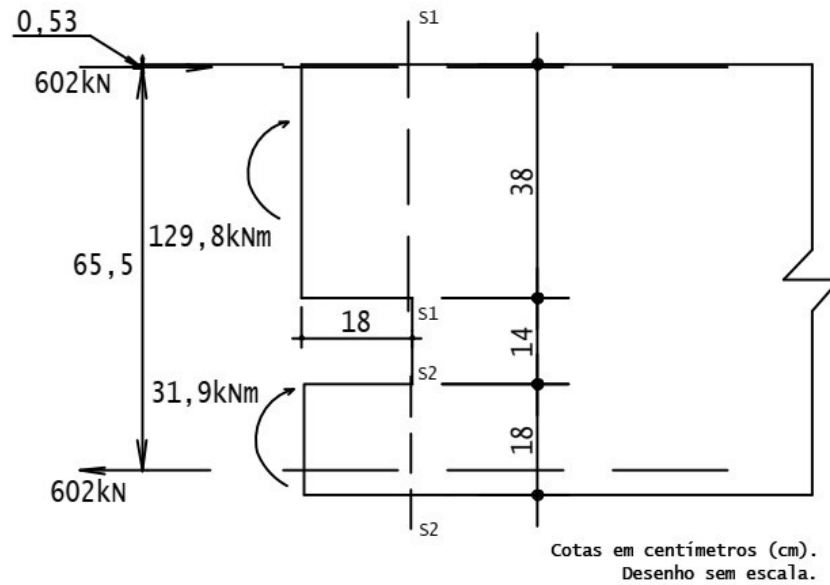
Logo mais, calculam-se os momentos nos eixos das seções, com as equações (30) e (31).

$$M_{S1d} = 18,53 + 602,3 * \left(\frac{0,38}{2} - 0,0053 \right) = 129,8 \text{ kN.m}$$

$$M_{S2d} = 1,81 + 602,3 * \left(\frac{0,18}{2} - 0,04 \right) = 31,9 \text{ kN.m}$$

Portanto, na Figura 56 é ilustrado o furo F7 com os esforços atuantes nas seções S₁-S₁ e S₂-S₂.

Figura 56 - Esforços das seções S₁-S₁ e S₂-S₂ do furo F7.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Por fim, utilizando o ábaco tabela II-11 do Süsskind (1984) são realizados os seguintes cálculos para determinação das áreas de aço nas seções comprimida e tracionada, ou seja, a seção S₁- S₁ e seção S₂- S₂, respectivamente.

O ábaco também está disponível no Anexo F para melhor visualização.

$$v_{S1} = \frac{N_d}{b * h * f_{cd}} = \frac{602,3}{0,30 * 0,38 * \frac{40000}{1,4}} = 0,18$$

$$\mu_{S1} = \frac{M_{S1d}}{b * h^2 * f_{cd}} = \frac{129,8}{0,30 * 0,38^2 * \frac{40000}{1,4}} = 0,10$$

$$v_{S2} = \frac{N_d}{b * h * f_{cd}} = \frac{602,8}{0,30 * 0,18 * \frac{40000}{1,4}} = 0,39$$

$$\mu_{S2} = \frac{M_{S2d}}{b * h^2 * f_{cd}} = \frac{31,9}{0,30 * 0,18^2 * \frac{40000}{1,4}} = 0,11$$

Com esses valores e realizando as combinações dos resultados no ábaco, tem-se que será adotado $\omega = 0,03$ para a compressão e para a tração $\omega = 0,67$.

Assim, primeiramente, calculam-se as áreas mínimas para as seções S₁- S₁ e S₂- S₂ com auxílio da equação (36), obtendo os seguintes valores:

$$A_{s,min_{S1}} = 2,08 \text{ cm}^2 < 4,56 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min_{S2}} = 2,08 \text{ cm}^2 < 2,16 \text{ cm}^2$$

Dessa forma, a área mínima de aço é 4,56 cm² para a seção comprimida e 2,16 cm² para a seção tracionada.

Em seguida, será determinado o valor de área total para a seção comprimida com a equação (37).

$$A_{s,total_{S1}} = \frac{0,03 * 0,30 * 0,38 * \frac{40000}{1,4}}{\frac{500000}{1,15}} = 1,87 * 10^{-4} m^2 = 1,87 \text{ cm}^2$$

Correspondendo a 0,94 cm² em cada bordo. Com isso em mente, na seção comprimida deve ser adotada a área mínima de 4,56 cm². Portanto, recomenda-se a colocação de 4 barras de ϕ 12,5 mm.

Logo mais, para a seção tracionada terá o seguinte resultado.

$$A_{s,total_{S2}} = \frac{0,67 * 0,30 * 0,18 * \frac{40000}{1,4}}{\frac{500000}{1,15}} = 23,78 * 10^{-4} m^2 = 23,78 \text{ cm}^2$$

Correspondendo a 11,89 cm² em cada bordo. Utilizando, assim, 4 barras de ϕ 20,0 mm.

Adotando a altura útil dessa seção como 34 cm e realizando a verificação das tensões de compressão nas bielas do concreto, com auxílio da equação (38), tem-se o seguinte resultado.

$$V_{sd} = 100,8 \text{ kN} < V_{Rd2,l} = 0,27 * \left(1 - \frac{40}{250}\right) * \frac{40000}{1,4} * 0,30 * 0,34 = 661 \text{ kN}$$

Assim como explicado anteriormente, a força cortante resistente é maior que a força cortante solicitante, dessa forma, não há perigo de esmagamento do concreto das bielas. Logo, é correto calcular a área de armadura transversal.

Inicialmente, será estipulado o valor da força cortante resistida correspondente à taxa de armadura mínima com auxílio da fórmula (45).

$$V_{RI,\rho min} = 644 * 1,4 * 0,30 * 0,34 * \left(0,1522 * 40^{\frac{2}{3}}\right) = 163,7 \text{ kN}$$

Como a força cortante aplicada é menor que a força cortante resistida correspondente à taxa de armadura mínima, utiliza-se a armadura transversal mínima para ambas as seções comprimida e tracionada.

Utilizando a equação (43) e recordando que $\rho_{sw} \geq 0,001$, calcula-se a área mínima de armadura transversal por metro com inclinação de 90°.

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min} = 0,001 * 0,3 * \text{sen}(90) = 4,21 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Nesse caso, também é recomendado, no mínimo, o uso de ϕ 6,3 mm c/ 7,0 cm.

Em seguida, é feita a verificação do espaçamento com os parâmetros estabelecidos pela norma brasileira, utiliza-se a equação (46). E como $V_{sd} = 0,15 * V_{Rd, I}$, tem-se que o valor máximo para o espaçamento é $s_{max} = 0,6 * 20 = 12 \text{ cm}$. O valor adotado está em conformidade.

Assim, é realizado o cálculo da armadura dos estribos para “suspensão” do cortante com a equação (47).

$$A_{sup} = \frac{100,8}{\frac{500000}{1,15}} = 2,32 * 10^{-4} \text{ m}^2 = 2,32 \text{ cm}^2$$

Para a armadura de suspensão será adotada 3 barras ϕ 10,0 mm.

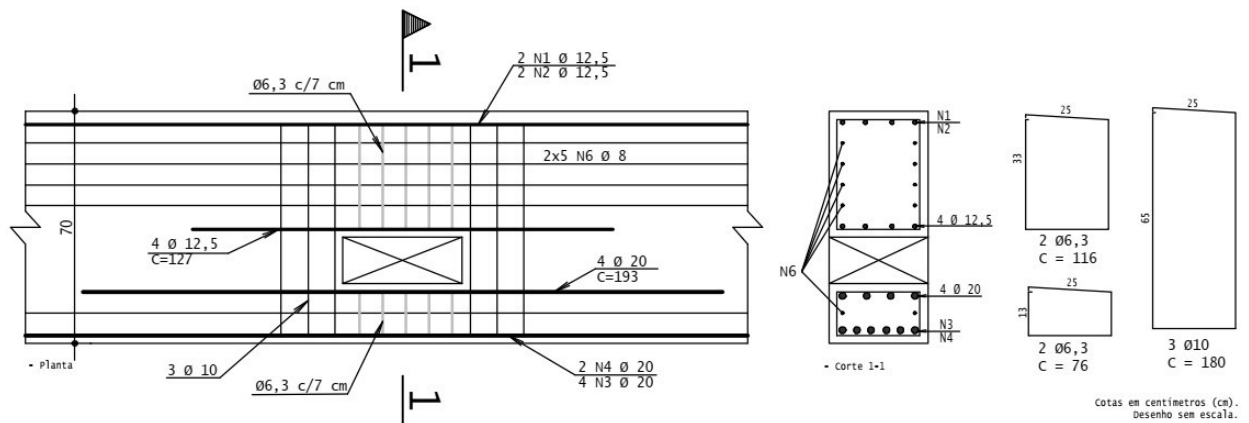
O comprimento de ancoragem é determinado por meio da equação (48), sendo que os resultados encontrados foram de 35 cm para a região comprimida e 55 cm para a região tracionada, conforme apresentado abaixo:

$$l_{b,s1} = \frac{12,5}{4} * \frac{\frac{500}{1,15}}{2,25 * 1,0 * 1,0 * 1,75} = 344 \text{ mm} = 34,4 \text{ cm}$$

$$l_{b,s2} = \frac{20,0}{4} * \frac{\frac{500}{1,15}}{2,25 * 1,0 * 1,0 * 1,75} = 551 \text{ mm} = 55,1 \text{ cm}$$

Por fim, o detalhamento e corte transversal são apresentados na Figura 57.

Figura 57 – Detalhe furo 7.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

4.5. Calculadora do TQS

A empresa TQS foi fundada no ano de 1986 no Brasil por projetistas estruturais, sendo que essa organização é especializada na criação, desenvolvimento e comercialização de programas voltados para a elaboração de projetos estruturais e de fundações para construções. A empresa é referência no setor de atuação, contando com uma base de usuários no território brasileiro e alguns países do exterior.

O programa também conhecido como TQS é capaz de integrar todas as fases de um projeto estrutural de concreto armado, pré-moldado e alvenaria estrutural, desde a concepção da estrutura até a geração de plantas. Para que ocorra essa integração sistemática, a plataforma fragmenta-se em sistemas específicos de concepção estrutural, modelagem, análise estrutural, dimensionamento, detalhamento e desenho.

Há também ferramentas auxiliares incluídas no sistema TQS para a análise de elementos estruturas isoladamente, sendo essas denominadas calculadoras. Essas calculadoras são fundamentais na verificação de resultados, na otimização de um dimensionamento, na viabilização de ajustes e alterações e na compreensão de um comportamento específico e particular do elemento.

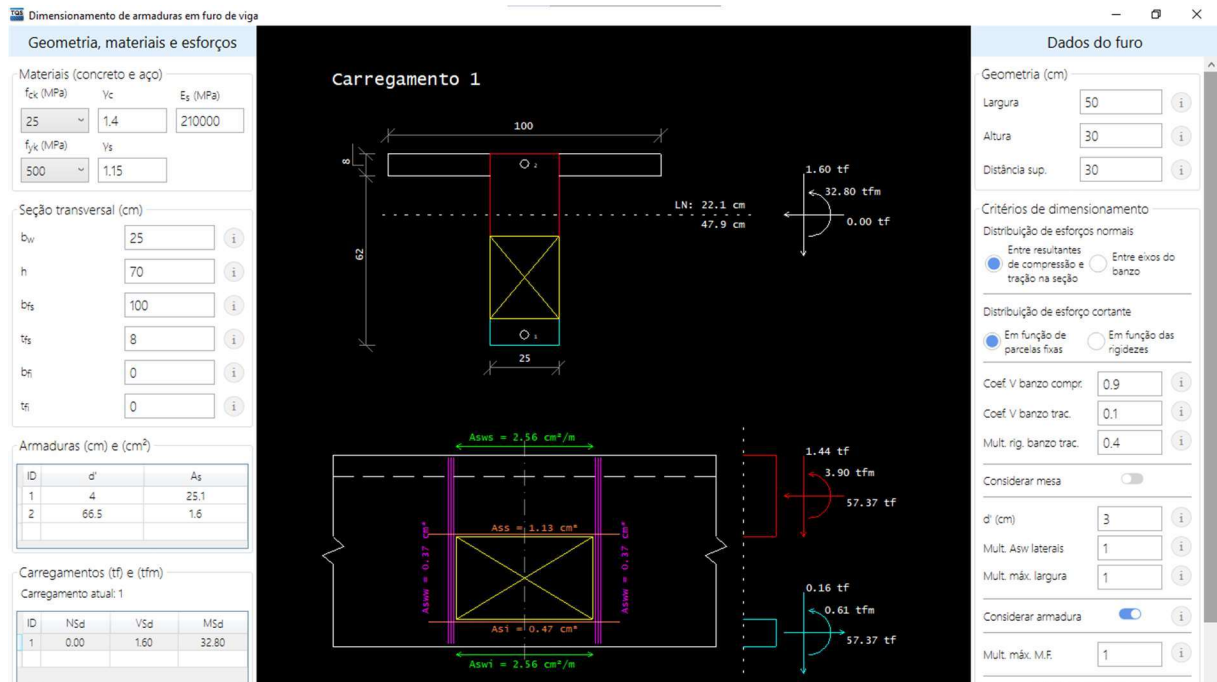
Existem diversas calculadoras complementares ao sistema, como por exemplo: calculadora para o dimensionamento de armadura longitudinal em seção retangular ou T submetida à flexão simples, calculadora para o dimensionamento de armadura longitudinal em seção retangular ou T submetida à flexão composta normal, calculadora para o dimensionamento de armadura transversal em seção retangular submetida à força cortante combinada com torção, entre outras.

Dessa forma, nesse item é estudada a nova calculadora de furos em vigas, que foi lançada a partir da versão V23, em março de 2022, renovando as versões anteriores com a inclusão de novos recursos. Essa ferramenta auxilia na conferência de resultados de cálculos, otimização, ajustes, alteração e compreensão do comportamento da viga com furo definido em projeto, ou também, como instrumento de estudo para uma situação hipotética de furação.

Na Figura 58 é apresentada a janela da calculadora de furos em vigas ao iniciar a ferramenta auxiliar. É determinado do lado esquerdo a inserção dos dados de

geometria, materiais e esforços da viga, enquanto no lado direito são inseridos os dados do furo, já no centro, o programa gera os dados de saída dos cálculos, juntamente com a representação em desenho, baseados nos valores de entrada.

Figura 58 – Apresentação calculadora de furos em vigas no programa TQS.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Logo, nos subitens a seguir serão adicionados os dados da viga e, também, dos furos F1 e F7, anteriormente calculados manualmente, para que possam ser calculados com o auxílio do TQS a fim de fazer a verificação dos valores encontrados em ambos os métodos.

4.5.1. Dados da viga

Em primeiro os valores dos materiais de concreto e aço, como mostrado na Figura 59, sendo, resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), coeficiente de ponderação de resistência do concreto (coeficiente de segurança) (γ_c), módulo de elasticidade do aço (E_s), resistência característica da armadura correspondente ao patamar de escoamento (f_{yk}) e coeficiente de ponderação de resistência da armadura (coeficiente de segurança) (γ_s).

Figura 59 – Dados dos materiais da viga V22 no programa TQS.

Materials (concreto e aço)

f_{ck} (MPa)	γ_c	E_s (MPa)
40	1.4	210000
f_{yk} (MPa)	γ_s	
500	1.15	

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Em seguida, a definição da seção transversal da viga (Figura 60), sendo a largura da seção (b_w), altura da seção (h), largura da mesa superior (b_{fs}), altura da mesa superior (t_{fs}), largura da mesa inferior (b_{fi}) e altura da mesa inferior (t_{fi}).

Figura 60 – Dados da seção transversal da viga V22 no programa TQS.

Seção transversal (cm)

b_w	30	i
h	70	i
b_{fs}	236	i
t_{fs}	5	i
b_{fi}	0	i
t_{fi}	0	i

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Após, são determinadas as posições (d') e áreas de armaduras (A_s) (Figura 61), sendo a armadura positiva de 6 barras de ϕ 20,0 mm e a armadura negativa de 4 barras de ϕ 12,5 mm.

Figura 61 – Armaduras da viga V22 no programa TQS.

Armaduras (cm) e (cm²)

ID	d'	A_s
1	4	18.8
2	66.4	4.9

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

4.5.2. Dados do furo F1

Após a inserção dos valores gerais para a viga, ou seja, qualquer furo para essa viga utilizam-se os valores anteriormente apresentados, logo, são incluídos os dados para o furo F1 em específico.

Ainda na aba esquerda, é encontrada a novidade dessa versão: o item de inserção dos carregamentos na seção onde o furo está presente (Figura 62). Esses foram adicionados conforme calculado no item 4.4.1 desse trabalho.

Figura 62 – Dados do carregamento do furo F1 no programa TQS.

Carregamentos (tf) e (tfm)

Carregamento atual: 1

ID	NSd	VSd	MSd
1	0.00	9.12	31.37

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Essa função de carregamentos também pode ser resgatada das combinações de esforços do pórtico espacial do edifício, onde o furo se encontra. Caso isso ocorra, será verificada a seção com os carregamentos automaticamente de forma que o usuário possa alterar as combinações a seu critério e analisar imediatamente as armaduras referentes ao carregamento escolhido.

Em seguida, na aba da lateral direita serão inseridos os dados do furo F1. Primeiro são inseridos os valores da geometria da furação, ou seja, largura, altura e distância da face superior do furo à face superior da viga, todos em centímetros, como apresentado na Figura 63.

Figura 63 – Geometria do furo F1 no programa TQS.

Geometria (cm)

Largura i

Altura i

Distância sup. i

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Abaixo desse, são colocados os critérios do dimensionamento do furo. Nesse item é necessária atenção do projetista, para que adote a melhor configuração conforme parâmetros de dimensionamento.

Assim, será analisado em partes cada subitem dos critérios de dimensionamento, na Figura 64 são apresentados os parâmetros para distribuição de esforços normais e distribuição de esforço cortante.

Figura 64 – Critérios de dimensionamento do furo F1 – Parte 1 no programa TQS.

Critérios de dimensionamento

Distribuição de esforços normais

☒ Entre resultantes de compressão e tração na seção ☐ Entre eixos do banzo

Distribuição de esforço cortante

☒ Em função de parcelas fixas ☐ Em função das rigidezes

Coef. V banzo compr. 

Coef. V banzo trac. 

Mult. rig. banzo trac. 

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Como foi utilizado o método Sússekind, para melhor comparação, adota-se a distribuição de esforços normais entre resultantes de compressão e tração na seção. Para trabalhos futuros, recomenda-se a comparação entre os métodos Sússekind e Fusco e Milton, que utiliza a conduta de distribuição de esforços normais entre eixos do banzo, ou seja, diferentes maneiras de se calcular o braço de alavanca.

Em relação a distribuição de esforço cortante, foi adotado em função das parcelas fixas, sendo que o coeficiente de esforço cortante no banzo comprimido é 1,0 e o coeficiente de esforço cortante no banzo tracionado é 0,1 adicional, assim como Sússekind adota em suas fórmulas. Todos os autores estudados nesse trabalho adotam a distribuição de esforço cortante em função de parcelas fixas.

Ademais, na Figura 65 são apresentados os critérios de dimensionamento faltantes. Como informado anteriormente, os próximos parâmetros também são adotados baseados no método Süsserkind.

Figura 65 – Critérios de dimensionamento do furo F1 – Parte 2 no programa TQS.

Considerar mesa ☒

d' (cm) ⓘ

Mult. Asw laterais ⓘ

Mult. máx. largura ⓘ

Considerar armadura ☐ ⓘ

Mult. máx. M.F. ⓘ

Norma para flexão:
☒ NBR 6118 ☐ CIRSOC-201

Norma para cortante:
☒ NBR 6118 ☐ CIRSOC-201

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

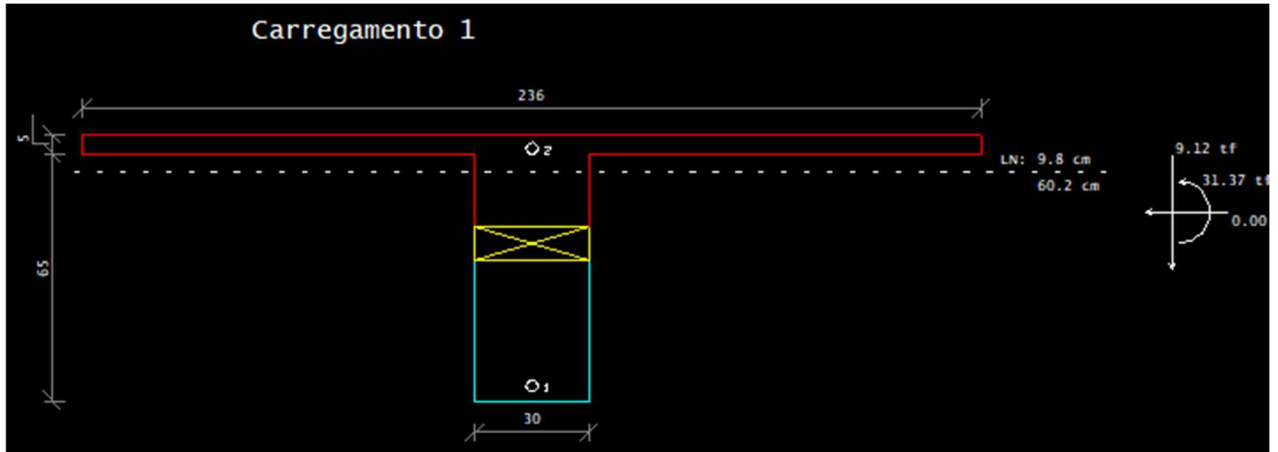
Assim, conforme explicitado nos cálculos da seção 4.4.1 ocorre a consideração da mesa colaborante e o d' para dimensionamento de armaduras é 4 centímetros. Multiplicador para cálculo de A_{sw} nas laterais e multiplicador que define largura máxima do furo não são determinados pelo método usado.

Também não há informação que pelo método Süsserkind há a consideração do dimensionamento da armadura longitudinal positiva e negativa, assim, pela compreensão do método e informações do programa, caso contrário, será considerado armadura simétrica nos banzos. Não foi determinado multiplicador para cálculo do momento fletor nos banzos, assim, esse não foi adicionado.

Por fim, as normas disponíveis para os critérios de dimensionamento são a NBR 6118, norma brasileira, e a CIRSOC 201, norma argentina. Sendo que todos os cálculos deste trabalho foram feitos baseados na norma técnica brasileira.

Logo mais, o programa apresenta os dados de entrada e de saída por meio de representação gráfica. Assim, na Figura 66 são mostrados os dados inseridos para a viga, sendo as dimensões e carregamentos, e a determinação da linha neutra.

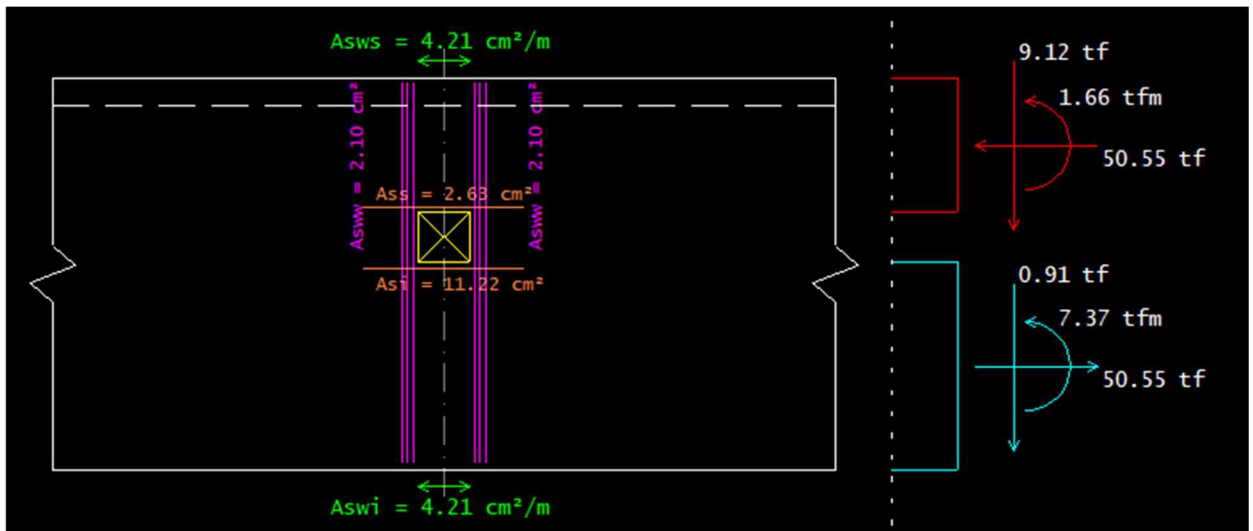
Figura 66 – Carregamento 1 para o furo F1 no programa TQS.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Já na Figura 67 são apresentados os dados de saída dos cálculos dos esforços cortante, normal e fletores e das armaduras de reforço.

Figura 67 – Dados de saída do TQS – furo F1 no programa TQS.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Quando o programa está analisando uma viga diretamente de um pórtico espacial de um edifício, a calculadora vai gerar possíveis mensagens. Sendo que essas são:

- As armaduras longitudinais e transversais foram dimensionadas corretamente;

- A seção como um todo não passou;
- Impossível dimensionar armadura longitudinal sobre o furo;
- Impossível dimensionar armadura longitudinal sob o furo;
- Impossível dimensionar armadura transversal sobre o furo;
- Impossível dimensionar armadura transversal sob o furo;
- Impossível dimensionar armadura transversal nas laterais do furo;
- Furo está demasiadamente na zona comprimida;
- Furo com largura máxima acima do limite.

Dessa forma, é notório que há oito situações que podem não ocorrer equilíbrio entre a seção e esforços definidos pelo projetista estrutural.

4.5.3. Dados do furo F7

Assim como realizado manualmente, o cálculo do furo F7 também será demonstrado para comparação com os resultados encontrados no item 4.4.2. Inserindo os valores gerais na viga, ademais serão apresentados apenas determinações diferentes das utilizadas em ademão.

Na Figura 68 apresentam-se os dados do carregamento no eixo do furo F7.

Figura 68 – Dados do carregamento do furo F7 no programa TQS.

Carregamentos (tf) e (tfm)

Carregamento atual: 1

ID	NSd	VSd	MSd
1	0.00	10.08	39.44

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A geometria do furo foi inserida conforme apresentado na Figura 69.

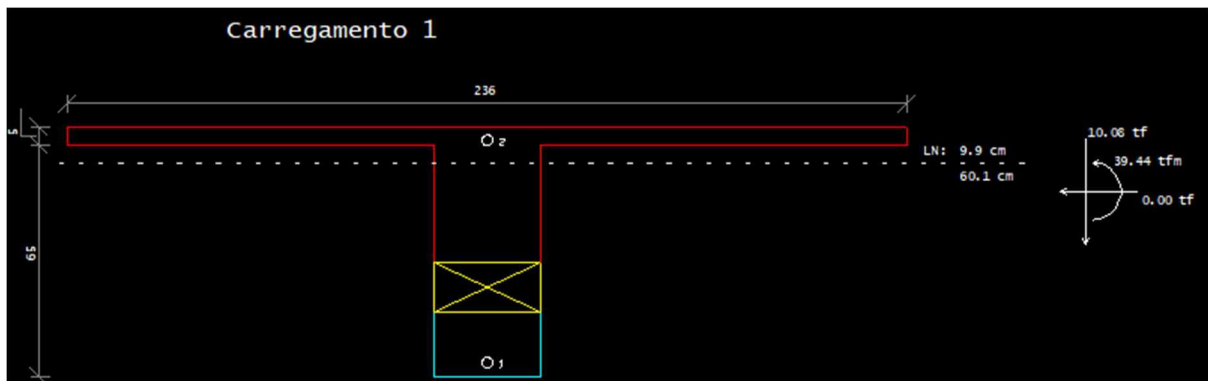
Figura 69 – Geometria do furo F7 no programa TQS.

Geometria (cm)		
Largura	36	i
Altura	14	i
Distância sup.	38	i

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Por fim, o programa TQS gerou os dados de carregamentos iniciais e linha neutra por meio de representação gráfica como apresentado na Figura 70.

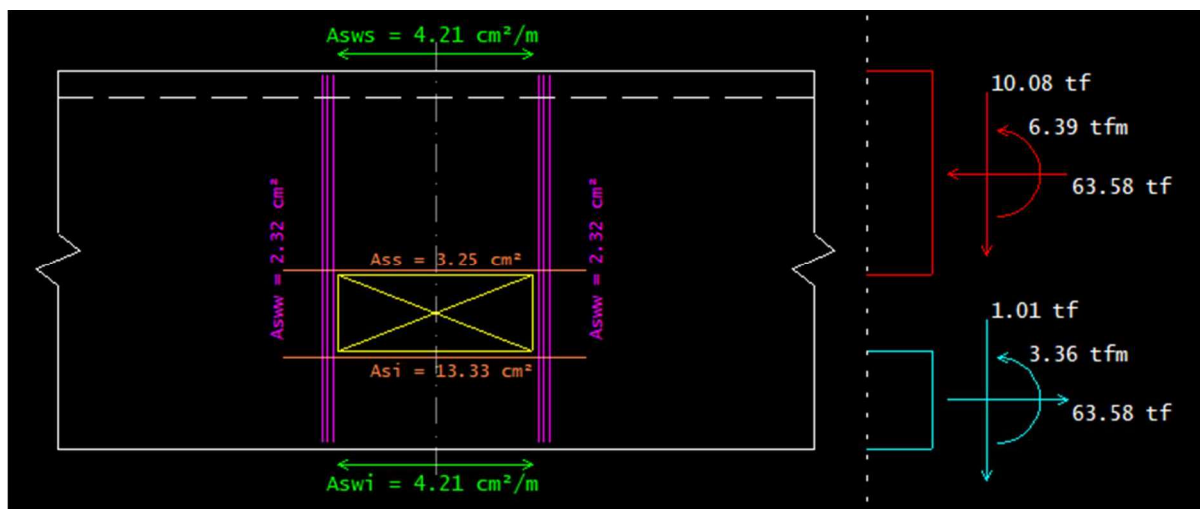
Figura 70 – Carregamento 1 para o furo F7 no programa TQS.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Na Figura 71 são mostrados os dados de esforços calculados na seção e as armaduras usadas no reforço da furação.

Figura 71 – Dados de saída do TQS – furo F7 no programa TQS.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

4.6. Comparações método Süssekind e TQS

Com os resultados obtidos através dos cálculos manuais, descritos em ademão, assim como os gerados pelo programa TQS, é realizada a comparação das áreas de aço por meio de uma diferença em porcentagem conforme a equação (50), sendo que os resultados são apresentados na Tabela 5.

$$Diferença(\%) = \left(\frac{\text{Resultado Süssekind}}{\text{Resultado TQS}} - 1 \right) * 100 \quad (50)$$

Tabela 5 – Diferença em porcentagem entre as áreas de aço encontradas.

		Método Süssekind	Programa TQS	Diferença (%)
F1	A _{s,S1} (cm ²)	2,88	2,63	9,51%
	A _{s,S2} (cm ²)	10,21	11,22	-9,00%
	A _{sw,S1} (cm ² /m)	4,21	4,21	0,00%
	A _{sw,S2} (cm ² /m)	4,21	4,21	0,00%
	A _{s,susp} (cm ²)	2,10	2,10	0,00%
F2	A _{s,S1} (cm ²)	5,64	3,66	54,10%
	A _{s,S2} (cm ²)	8,35	9,51	-12,20%
	A _{sw,S1} (cm ² /m)	4,21	4,21	0,00%
	A _{sw,S2} (cm ² /m)	4,21	4,21	0,00%
	A _{s,susp} (cm ²)	1,78	1,78	0,00%
F3	A _{s,S1} (cm ²)	5,16	3,48	48,28%
	A _{s,S2} (cm ²)	9,80	11,58	-15,37%
	A _{sw,S1} (cm ² /m)	4,21	4,21	0,00%
	A _{sw,S2} (cm ² /m)	4,21	4,21	0,00%
	A _{s,susp} (cm ²)	1,47	1,47	0,00%
F4	A _{s,S1} (cm ²)	3,96	3,03	30,69%
	A _{s,S2} (cm ²)	16,01	17,32	-7,56%
	A _{sw,S1} (cm ² /m)	4,21	4,21	0,00%
	A _{sw,S2} (cm ² /m)	4,21	4,21	0,00%
	A _{s,susp} (cm ²)	0,56	0,56	0,00%
F5	A _{s,S1} (cm ²)	4,20	3,12	34,62%
	A _{s,S2} (cm ²)	15,30	16,25	-5,85%
	A _{sw,S1} (cm ² /m)	4,21	4,21	0,00%

		Método Süsskind	Programa TQS	Diferença (%)
	$A_{sw,S2} \text{ (cm}^2\text{/m)}$	4,21	4,21	0,00%
	$A_{s,susp} \text{ (cm}^2\text{)}$	1,31	1,31	0,00%
F6	$A_{s,S1} \text{ (cm}^2\text{)}$	4,97	2,63	88,97%
	$A_{s,S2} \text{ (cm}^2\text{)}$	15,79	15,83	-0,25%
	$A_{sw,S1} \text{ (cm}^2\text{/m)}$	4,21	4,21	0,00%
	$A_{sw,S2} \text{ (cm}^2\text{/m)}$	4,21	4,21	0,00%
	$A_{s,susp} \text{ (cm}^2\text{)}$	1,64	1,64	0,00%
F7	$A_{s,S1} \text{ (cm}^2\text{)}$	4,56	3,25	40,31%
	$A_{s,S2} \text{ (cm}^2\text{)}$	11,89	13,33	-10,80%
	$A_{sw,S1} \text{ (cm}^2\text{/m)}$	4,21	4,21	0,00%
	$A_{sw,S2} \text{ (cm}^2\text{/m)}$	4,21	4,21	0,00%
	$A_{s,susp} \text{ (cm}^2\text{)}$	2,32	2,32	0,00%

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Através das comparações individuais, destacaram-se os valores mais elevados alcançados nos cálculos de área de aço da armadura longitudinal de reforço na seção S1-S1 ($A_{s,S1}$), sendo que os resultados encontrados nos cálculos manuais foram maiores que os realizados pelo programa TQS. Ademais, é notório que os valores encontrados para as áreas de aços das armaduras transversais e de suspensão foram iguais entre os cálculos, tendo uma diferença zerada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho em questão consistiu-se essencialmente na análise, dimensionamento e detalhamento das armaduras de reforços de uma viga de concreto armado projetada em um escritório de projetos estruturais, tanto com cálculos manuais quanto através do programa TQS, possibilitando a conclusão da praticidade alcançada com o uso do aplicativo. Além disso, conclui-se que as ferramentas auxiliares, como a calculadora de furos em vigas, implementadas no programa TQS são fundamentais para a agilidade na verificação de mudanças na estrutura de um edifício conforme projeto *mark-up*.

Ademais, a investigação da etapa de inserção dos furos durante a fase de projetos, ou seja, anteriormente ao início da construção, foi fundamental para o conhecimento da importância do passo a passo da compatibilização, idealizada através da metodologia BIM, envolvendo o projeto de furações, *mark-up*, e o projeto estrutural, a fim de evitar desperdício e economia nas construções, proporcionando uma melhor qualidade final.

Em relação à Norma Técnica Brasileira de Projetos de Estrutura de Concreto Armado - NBR 6118, conclui-se que durante vinte anos, ou seja, desde 2003 são utilizados os mesmos critérios limites para a dispensa de verificação dos furos que atravessam horizontalmente as vigas de concreto armado, apesar das diferenças na tecnologia comparando ambas as décadas e a magnitude dos edifícios.

Assim, por meio da Tabela 6 é perceptível as principais alterações contidas na norma, desde a sua criação, em relação as dimensões limites para não verificação de furos e aberturas no elemento estrutural viga.

Tabela 6 - Comparação entre as atualizações da NBR 6118.

Revisão dos furos	1940	1978	2003
Diâmetro transversal	$\leq e/3$	$\leq 12 \text{ cm ou } \leq h/2$	$\leq 12 \text{ cm ou } \leq h/3$
Distância entre furos	8Φ (eixos)	N.I.	$\geq 2h$
Distância face de apoio	N.I.	$\geq 2h$	$\geq 2h$
Cobrimentos	N.I.	Sim	Sim
Informação adicional	N.I.	Uma abertura no meio do tramo	Não seccionamento armadura
		Zona de tração	Zona de tração
		Não interromper qualquer barra da armadura	

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Por meio da elaboração desse trabalho, observou-se a importância da revisão bibliográfica enquanto está no procedimento de estudo e produção da obra, pois podem ocorrer revisões das referências adotadas e possíveis alterações nos dados.

No contexto dos autores analisados, Leonhardt e Mönning estabelecem como largura máxima para a dispensa de verificação de abertura uma distância igual ou inferior a 2 vezes a altura da viga, com a abertura situada a uma distância não inferior à altura da viga até o seu apoio.

Já Süsskind, método utilizado nesse trabalho, determina que a largura máxima da abertura deve ser igual ou inferior a 1,5 vezes a altura da viga, sendo a distância mínima entre as aberturas igual ou superior a 1,2 vezes a altura da viga, e a distância da abertura à face inferior da viga é igual ou superior a 10 cm.

Araújo explicita que a largura máxima do furo deve ser igual ou inferior a 1,5 vezes a altura da viga e, adicionando que, a distância mínima do furo ao apoio deve ser igual ou superior a 2 vezes altura da viga.

Item questionável durante o estudo foi a distinção entre os conceitos de furos e aberturas conforme determina a norma brasileira, assim, Fusco é a única bibliografia que determina uma diferenciação entre furos pequenos e grandes aberturas, sendo que aberturas podem ser consideradas pequenas quando apresentam diâmetros da ordem de 0,2 vezes a altura da viga.

Ademais, devido à distribuição do esforço cortante na área da abertura, torna-se essencial incorporar uma armadura de suspensão, a qual assume a forma de estribos verticais, podendo ou não ser complementada por barras inclinadas, assim conforme equação abaixo, de Sánchez Filho (1999):

$$A_{s,susp} = k' * \frac{V_d}{f_{yd}} \quad (51)$$

Onde, k' = a porcentagem de força cortante suspensa por estribos.

Notou-se que existem diferenças na adoção dessa porcentagem entre os autores, enquanto Sússekkind considera 100% da força cortante, os outros autores estudados consideram apenas 80% da força total cortante.

Por meio do método Sússekkind e seus exemplos pode-se notar a utilização da armadura longitudinal de reforço duplicada na seção comprimida, ou seja, tanto na face superior do furo quanto na face superior da viga. Através dos estudos, determinou que essa armadura na face superior da viga foi devido a não existência de armadura longitudinal negativa preliminar, assim, no caso apresentado nesse trabalho não ocorreu a necessidade dessa duplicação.

Outrossim, com relação a comparação dos resultados obtidos pelo método Sússekkind com o programa TQS, sendo a adoção dos dados de saída para os parâmetros escolhidos pela autora, notou-se diferenças percentuais mais altas para a área de aço da armadura longitudinal de reforço na seção S₁-S₁, sendo que para os valores dessas foram: furo F1, 9,51%; furo F2, 54,10%; furo F3, 48,28%; furo F4, 30,69%; furo F5, 34,62%; furo F6, 88,97% e furo F7, 40,31%.

Além disso, a comparação entre os resultados alcançados permitiu entender que os cálculos para as armaduras transversais e de suspensão geraram resultados

iguais para o método Süsserkind e o programa TQS. Assim, para as áreas de aço dessas armaduras foram obtidos 0,00% de diferenças.

Notou-se também que a armadura de reforço calculada pelo projetista estrutural responsável por esse projeto está condizente com os valores alcançados pelo programa TQS.

Por fim, após todo o estudo garantido pelo presente trabalho, pode-se concluir que o projetista estrutural tem total responsabilidade ao determinar os parâmetros a serem considerados para seu projeto em relação às furações, pois apesar dos critérios limites normativos, ainda assim é possível realizar aberturas, quando verificadas e dimensionadas corretamente, conforme solicitado pelo cliente.

5.1. Conclusões

Por meio do trabalho foram possibilitadas as seguintes conclusões:

- Praticidade e agilidade na verificação estrutural com a utilização das ferramentas auxiliares do programa TQS;
- Importância do passo a passo desejado da compatibilização;
- NBR 6118: 20 anos sem alteração em relação a furos e aberturas;
- Importância da revisão bibliográfica contínua durante o trabalho;
- Fusco estabelece as dimensões para diferença entre furo e abertura;
- O método Süsserkind demonstra duplicação na armadura seção S_1-S_1 apenas no caso do livro, não necessário com armadura existente;
- Armadura de reforço adotada pelo projetista condiz com programa TQS;
- Armadura de suspensão: Süsserkind 100% força cortante; outros autores, 80%;
- Diferenças em porcentagem mais altas para a área de aço da armadura longitudinal de reforço na seção S_1-S_1 para o método Süsserkind;

- Armaduras transversais e de suspensão foram dimensionadas análogas pelo método de cálculo e programa TQS;
- Projetista estrutural e sua responsabilidade.

5.2. Sugestões para futuros trabalhos

Recomenda-se para trabalhos futuros a comparação entre os critérios normativos adotados em outros países e regiões, como Estados Unidos, Argentina e Europa, para a disposição de aberturas em elementos estruturais, podendo alcançar resultados diferentes do que os obtidos da norma brasileira NBR 6118:2023.

Logo mais, sugere-se a comparação do dimensionamento e detalhamento entre os autores descritos nesse trabalho, podendo verificar os resultados obtidos para as armaduras de reforço com os métodos Leonhardt e Mönning, Fusco e Araújo.

Sugere-se também o estudo de furos mais próximos a região tracionada e mais distantes, por meio do método Süssekind, para verificação das possíveis diferenças na área de aço da armadura de reforço.

Além disso, é recomendado o estudo dos critérios de determinação da área de aço da armadura de reforço considerando a armadura existente na viga, visto que ao adotar esse parâmetro no programa TQS pode-se notar uma diminuição significativa na área de aço.

Por fim, orienta-se a comparação na utilização do método Süssekind com o programa TQS e nos métodos Fusco e Araújo com o programa TQS, devido a diferença na determinação do braço de alavanca a ser utilizado nos cálculos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. M. DE. **Curso de concreto armado**. 4ª edição ed. Rio Grande: Editora Dunas, 2014. v. Volume 2

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL. **Recomendação ABECE 004:2016 - fluxo de desenvolvimento de projetos de edifícios e atendimento à obra**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB1: cálculo e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1960.

____. **NB1: projeto e execução de obras de concreto armado: procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1978.

____. **NBR 6118: projeto e execução de obras de concreto armado: procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1980.

____. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

____. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

____. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

____. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS GESTORES E COORDENADORES DE PROJETOS (AGESC). **Manual de escopo de projeto e serviços de coordenação de projetos**. 3ª edição ed. São Paulo: Manuais de Escopo, 2019.

ÁVILA, V. M. **Compatibilização de projetos na construção civil: estudo de caso em um edifício residencial multifamiliar**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

BRIXNER, D. **Análise teórica e experimental de aberturas horizontais em vigas de concreto armado**. Santa Cruz do Sul: Universidade de Santa Cruz do Sul, 2017.

CARNEIRO, F. L. L. B. **As normas brasileiras de projeto de estruturas de concreto: história e evolução**. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 1993.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. DE F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003**. 3ª edição ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2012.

____. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4ª edição ed. São Paulo: EdUFSCar, 2016.

CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Análisis del rendimiento estructural de vigas Vierendeel. **Informes de la Construcción**, v. Vol. 54, n. n° 483, p. 27–37, 2003.

FARIAS, I. **Influência de furos e aberturas em estruturas de concreto armado: análise de furos horizontais para passagem de tubulações em vigas convencionais**. São Luís: Universidade Federal do Maranhão, 2019.

FARINA, H. Recomendações para o processo de furação em projetos BIM. **XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2022.

FUSCO, P. B. **Fundamentos do projeto estrutural**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976. v. Volume 1

_____. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1995.

GIUGLIANI, E. **Aberturas em elementos estruturais de concreto**. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2014.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto, volume 3: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 1978. v. Volume 3

LINO, J. C.; AZENHA, M.; LOURENÇO, P. Integração da metodologia BIM na engenharia de estruturas. **Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2012**, 2012.

MANSUR, M. A.; TAN, K.-H. **Concrete beams with openings: analysis and design**. Volume 20 ed. Singapore: CRC Press LLC, 1999.

MONTEIRO, A. C. N.; JÚNIOR, A. DA S. S.; CAVALCANTI, D. S. C.; PEREIRA, E. E. Compatibilização de projetos na construção civil: importância, métodos e ferramentas. **Revista Campo do Saber - ISSN 2447-5017**, v. Volume 3, n. n° 1, p. 53–76, 2017.

NOVELLETTO, M. A. **Projeto de furação: o próximo passo para compatibilizar seus projetos**. Disponível em: <<https://thorusengenharia.com.br/projeto-de-furacao-compatibilizar-seus-projetos/>>. Acesso em: 30 maio. 2023.

PAPADOPOULOS, N. A.; SOTELINO, E. D.; MARTHA, L. F.; NASCIMENTO, D. L. M.; FARIA, P. S. Avaliação da integração entre uma plataforma BIM e uma ferramenta de análise estrutural. **Sistemas & Gestão**, v. 12, n. 1, p. 108–16, 24 jul. 2017.

PINTOS, F. DE M. **Prescrições de cálculo e detalhamento de vigas segundo a NBR 6118 (2014)**. Disponível em: <<https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115004377114-Prescri%C3%A7%C3%B5es-de-c%C3%A1lculo-e-detalhamento-de-vigas-segundo-a-NBR-6118-2014->>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

PORTO, T. B.; FERNANDES, D. S. G. **Curso básico de concreto armado: conforme NBR 6118/2014**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2ª edição ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013.

ROCHA, A. M. DA. **Concreto armado**. 8ª edição ed. São Paulo: Nobel, 1988. v. 4º Volume

SÁNCHEZ FILHO, E. DE S. **Nova normalização brasileira para o concreto estrutural**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1999.

SIMÃO, D. W. DA G. **Análise e dimensionamento de vigas de concreto armado com aberturas na alma**. Caruaru: Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de concreto**. Porto Alegre: Editora Globo S.A., 1980. v. Volume I

____. **Curso de concreto vol. II**. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1984. v. Volume 2

THOMAZ, E. C. S. **História da norma NB1/1940 de concreto armado: relato do professor Fernando Lobo Carneiro**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, [s.d.].

ANEXO A – INFORMAÇÕES DOS FUROS EM PROJETO *MARKUP*

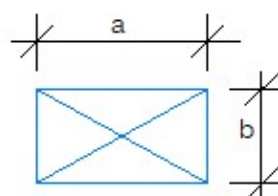
LEGENDA DE FURO LAJE - HIDRÁULICA

FURO CIRCULAR

-  FUROS Ø 50
-  FUROS Ø 75
-  FUROS Ø 150
-  FUROS Ø 100
-  FUROS Ø 250

ACRESCENTAR 2CM

FURO RETANGULAR



a = LARGURA DO FURO;

b = ALTURA DO FURO;

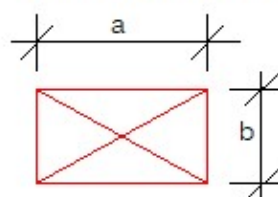
LEGENDA DE FURO LAJE - ELÉTRICA

FURO CIRCULAR

-  FUROS Ø 50
-  FUROS Ø 75
-  FUROS Ø 150
-  FUROS Ø 100
-  FUROS Ø 250

ACRESCENTAR 2CM

FURO RETANGULAR



a = LARGURA DO FURO;

b = ALTURA DO FURO;

ANEXO B – TABELA DE FERROS DA VIGA V22

TABELA DE FERROS						
AÇO	POS.	Ø (mm)	QUANT.	COMPRIMENTO		
				UNIT. (cm)	TOTAL (cm)	
V22						
50	1	12.5	2	1085	2170	
50	2	12.5	4	275	1100	
50	3	20	4	1090	4360	
50	4	20	2	840	1680	
60	5	5	110	195	21450	
50	6	8	10	1036	10360	

TABELA SEM ADIÇÃO DE 10% NO PESO FINAL

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	Ø (mm)	COMPR. (m)	PESO (kg)
60	5	215	33
50	8	104	41
50	12.5	33	31
50	20	60	149
Peso Total	60 =		33 kg
Peso Total	50 =		221 kg

ANEXO C – RELATÓRIO MOMENTO FLETOR DA VIGA - TQS

Vigas / Viga V22 / Vão 1 (Flexão)

Geometria

$L = 10,30 \text{ m}$
 $b_w = 30,0 \text{ cm}$
 $h = 70,0 \text{ cm}$
 $b_{cs} = 236,0 \text{ cm}$
 $h_{fs} = 5,0 \text{ cm}$

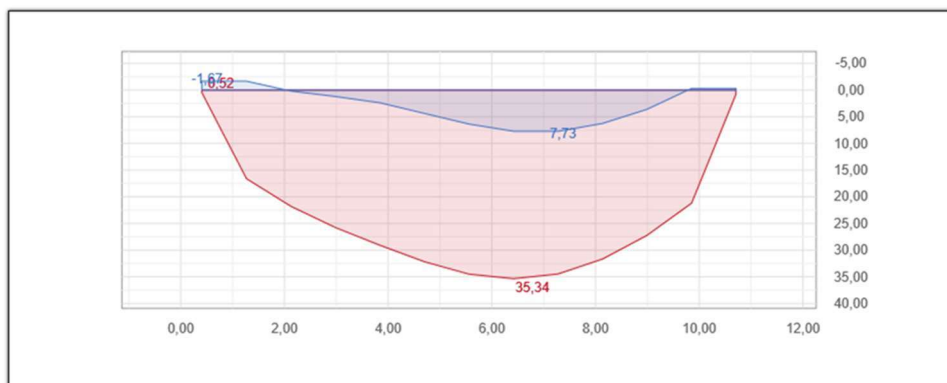
Materiais

$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$

Cobrimentos

$c = 2,50 \text{ cm}$

Envoltória de momento fletor (valores característicos) (tfm)



Dimensionamento à esquerda do vão

$M_{sk-} = 1,67 \text{ tfm}$
 $M_{1k,min-} = 10,10 \text{ tfm}$
 $A_s = 5,05 \text{ cm}^2$
 $A_{s'} = 0,00 \text{ cm}^2$
 $x/d = 0,06$
 $x/d (\text{max}) = 0,45$
Armadura = 4 Ø 12,5 mm
Asapo (Armadura que chega no extremo) = 8,20 cm²

Dimensionamento no meio do vão

$M_{sk+} = 35,34 \text{ tfm}$
 $M_{1k,min+} = 9,14 \text{ tfm}$
 $A_s = 17,44 \text{ cm}^2$
 $A_{s'} = 0,00 \text{ cm}^2$
 $LN = 1,7 \text{ cm}$
Armadura = 6 Ø 20,0 mm

Dimensionamento à direita do vão

$M_{sk-} = 0,32 \text{ tfm}$
 $M_{1k,min-} = 10,10 \text{ tfm}$
 $A_s = 5,05 \text{ cm}^2$
 $A_{s'} = 0,00 \text{ cm}^2$
 $x/d = 0,06$
 $x/d (\text{max}) = 0,45$

Armadura = 4 Ø 12,5 mm

Asapo (Armadura que chega no extremo) = 10,48 cm²

Armadura lateral

$A_{c,alma} = 2100,00 \text{ cm}^2$

Armadura = 10 Ø 8,0 mm

Flechas

$\Delta_{lim} = 4,12 \text{ cm (L/250)}$

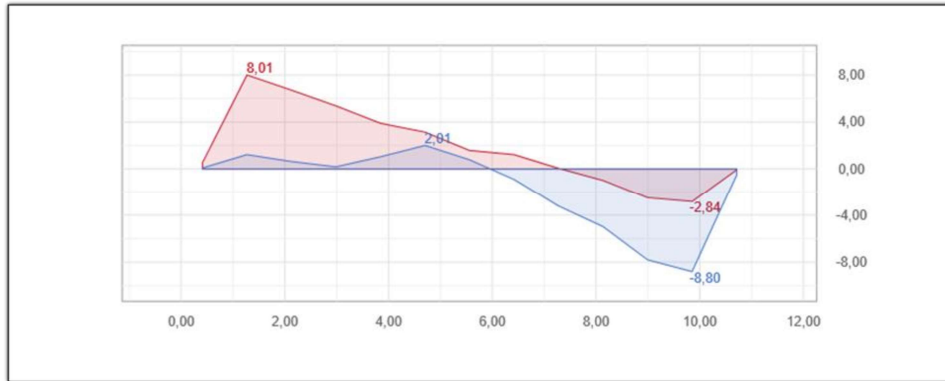
$\Delta = 2,04 \text{ cm (L/\Delta = 505)}$ - Flecha obtida da grelha linear ((Corrigida a deformação lenta 1,7 (1+alfa f))

ANEXO D – RELATÓRIO CISALHAMENTO DA VIGA - TQS

Vigas / Viga V22 / Vão 1 Faixa 1 (Cisalhamento)

Dimensionamento à cortante

Envoltória de esforço cortante (valores característicos) (tf)



$L = 9,88 \text{ m}$ ($x_i = 0,00 \text{ m}$; $x_f = 9,88 \text{ m}$)

$b_w = 30,0 \text{ cm}$

$d = 65,9 \text{ cm}$

Modelo I

$\theta = 45^\circ$

$V_{sd} = 12,30 \text{ tf}$

$V_{Rd2} = 128,26 \text{ tf}$

$V_{Rd3} = 11,20 \text{ tf}$

$V_c = 20,80 \text{ tf}$

$V_{sw} = -9,6 \text{ tf}$

$A_{sw} = 0,0 \text{ cm}^2/\text{m}$

$A_{sw,min} = 4,2 \text{ cm}^2/\text{m}$

Detalhamento

Número de ramos = 2

Armadura transversal = $\varnothing 5,0 \text{ mm}$ a cada $9,0 \text{ cm}$

$A_{sw,min}$: Armadura transversal mínima de cisalhamento.

b_{nuc} : Largura do núcleo de torção.

h_{nuc} : Altura do núcleo de torção.

h_e : espessura do núcleo de torção.

$A_{sw,1R}$: Armadura de torção calculada para 1 ramo de estribo.

$A_{sw,min,NR}$: Armadura transversal mínima de torção para N ramos de estribo selecionado.

$A_{sl,bw}$: Armadura longitudinal de torção no lado b.

$A_{sl,h}$: Armadura longitudinal de torção no lado h.

%dT: % limite de TRd2 para desprezar o Momento de torção Tsd.

ANEXO E – QUADRO VALORES KMD

142 Cálculo e dimensionamento de estruturas usuais de concreto armado

$$K_{md} = \frac{1}{b}$$

Quadro 3.1 Valores para cálculo de armadura longitudinal de seções retangulares para concretos até a classe C50.

KMD	KX	KZ	ϵ_c	ϵ_s	KMD	KX	KZ	ϵ_c	ϵ_s
0,0100	0,0148	0,9941	0,1502	10,000	0,2050	0,3506	0,8597	3,5000	6,4814
0,0200	0,0298	0,9881	0,3068	10,000	0,2100	0,3609	0,8556	3,5000	6,1971
0,0300	0,0449	0,9820	0,4704	10,000	0,2150	0,3714	0,8515	3,5000	5,9255
0,0400	0,0603	0,9759	0,6414	10,000	0,2200	0,3819	0,8473	3,5000	5,6658
0,0500	0,0758	0,9697	0,8205	10,000	0,2250	0,3925	0,8430	3,5000	5,4170
0,0550	0,0836	0,9665	0,9133	10,000	0,2300	0,4033	0,8387	3,5000	5,1785
0,0600	0,0916	0,9634	1,0083	10,000	0,2350	0,4143	0,8343	3,5000	4,9496
0,0650	0,0995	0,9602	1,1056	10,000	0,2400	0,4253	0,8299	3,5000	4,7297
0,0700	0,1076	0,9570	1,2054	10,000	0,2450	0,4365	0,8254	3,5000	4,5181
0,0750	0,1156	0,9537	1,3077	10,000	0,2500	0,4479	0,8208	3,5000	4,3144
0,0800	0,1238	0,9505	1,4126	10,000	0,2550	0,4594	0,8162	3,5000	4,1181
0,0850	0,1320	0,9472	1,5203	10,000	0,2600	0,4711	0,8115	3,5000	3,9287
0,0900	0,1403	0,9439	1,6308	10,000	0,2650	0,4830	0,8068	3,5000	3,7459
0,0950	0,1485	0,9406	1,7444	10,000	0,2700	0,4951	0,8020	3,5000	3,5691
0,1000	0,1569	0,9372	1,8611	10,000	0,2750	0,5074	0,7970	3,5000	3,3981
0,1050	0,1654	0,9339	1,9810	10,000	0,2800	0,5199	0,7921	3,5000	3,2324
0,1100	0,1739	0,9305	2,1044	10,000	0,2850	0,5326	0,7870	3,5000	3,0719
0,1150	0,1824	0,9270	2,2314	10,000	0,2900	0,5455	0,7818	3,5000	2,9162
0,1200	0,1911	0,9236	2,3621	10,000	0,2950	0,5586	0,7765	3,5000	2,7649
0,1250	0,1998	0,9201	2,4967	10,000	0,3000	0,5721	0,7712	3,5000	2,6179
0,1300	0,2086	0,9166	2,6355	10,000	0,3050	0,5858	0,7657	3,5000	2,4748
0,1350	0,2175	0,9130	2,7786	10,000	0,3100	0,5998	0,7601	3,5000	2,3355
0,1400	0,2264	0,9094	2,9263	10,000	0,3150	0,6141	0,7544	3,5000	2,1997
0,1450	0,2354	0,9058	3,0787	10,000	0,3200	0,6287	0,7485	3,5000	2,0672
0,1500	0,2445	0,9022	3,2363	10,000	0,3300	0,6590	0,7364	3,5000	1,8100
0,1550	0,2536	0,8985	3,3391	10,000	0,3400	0,6910	0,7236	3,5000	1,5652
0,1600	0,2630	0,8948	3,5000	9,8104	0,3500	0,7249	0,7100	3,5000	1,3283

Quadro 3.1 Continuação...

KMD	KX	KZ	ϵ_c	ϵ_s	KMD	KX	KZ	ϵ_c	ϵ_s
0,1650	0,2723	0,8911	3,5000	9,3531	0,3600	0,7612	0,6955	3,5000	1,0983
0,1700	0,2818	0,8873	3,5000	8,9222	0,3700	0,8003	0,6799	3,5000	0,8732
0,1750	0,2913	0,8835	3,5000	8,5154	0,3800	0,8433	0,6627	3,5000	0,6506
0,1800	0,3009	0,8796	3,5000	8,3106					
0,1850	0,3106	0,8757	3,5000	7,7662					
0,1900	0,3205	0,8718	3,5000	7,4204					
0,1950	0,3305	0,8678	3,5000	7,0919					
0,2000	0,3405	0,8638	3,5000	6,7793					

EXEMPLO 6

Para a seção retangular (concreto armado) do exemplo 1 ($b_w = 0,12$ m, $M = 12,2$ kNm), determinar a quantidade de armadura longitudinal necessária (A_s), admitindo, primeiramente, altura útil $d = 0,29$ m, e, em seguida, que ela não seja conhecida. Utilizar fórmulas adimensionais e quadro para dimensionamento. Considerar $f_{cd} = 20$ MPa (20000 kN/m²) e aço CA50.

a) Admitindo que a altura útil seja conhecida ($d = 29$ cm)

• Cálculo de KMD

$$KMD = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{17,08}{0,12 \cdot 0,29^2 \cdot \frac{20000}{1,4}} = 0,12$$

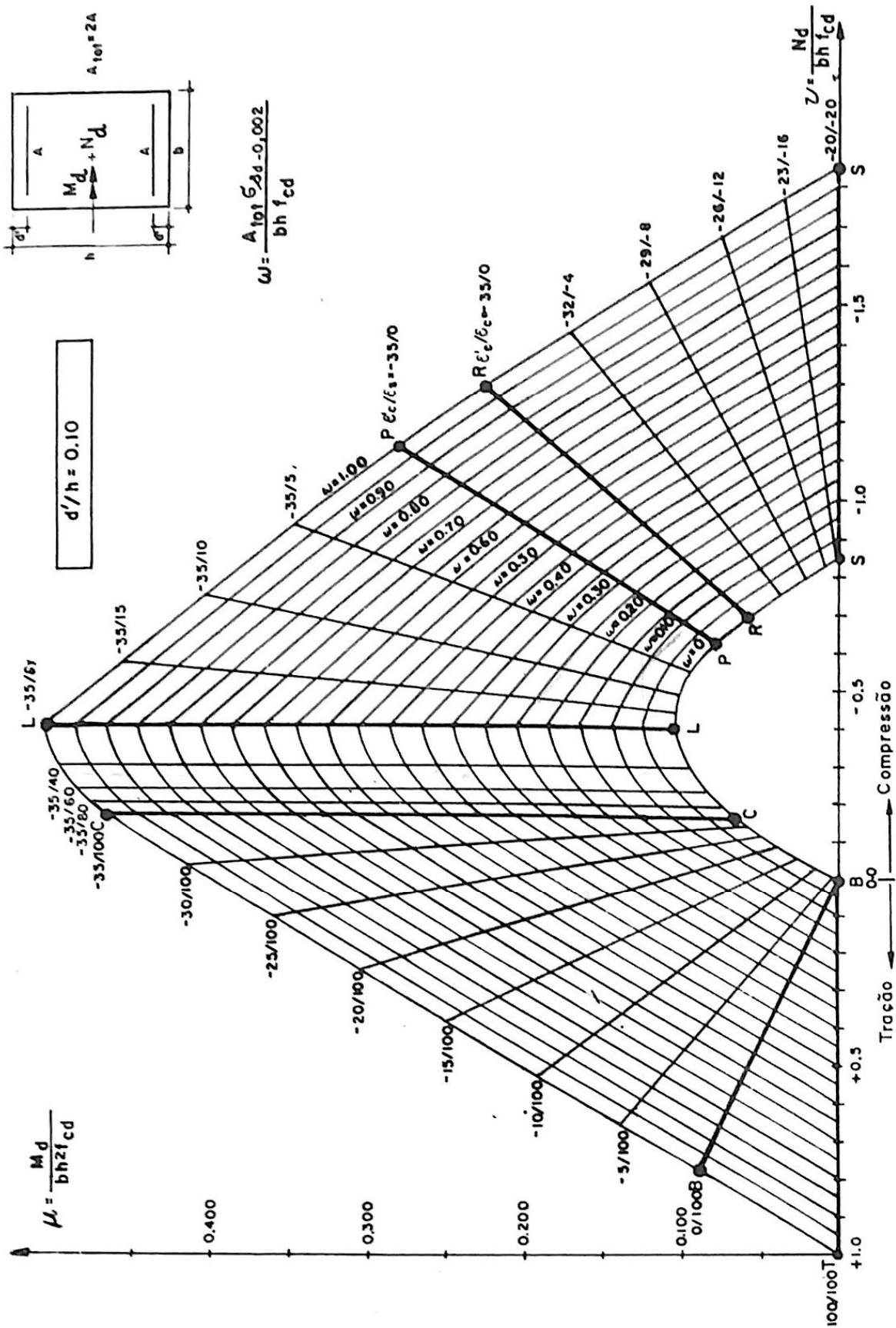
Com KMD = 0,12 (Quadro 3.1): KX = 0,1911; KZ = 0,9236; $\epsilon_c = 2,3621\text{‰}$; $\epsilon_s = 10,00\text{‰}$.

Como $KX = x/d < 0,45$, portanto abaixo do limite imposto pela norma, podem-se continuar os cálculos.

• Domínio em que a peça atingirá o estado limite último

$$\epsilon_s = 10,00\text{‰} \text{ e } \epsilon_c = 2,3621\text{‰} < 3,5\text{‰} \Rightarrow \text{domínio 2}$$

ANEXO F – ÁBACO SÜSSEKIND



Ábaco II-11 — Seção retangular submetida à flexão composta reta.

Tabela 7.5 – Área da seção de barras da armadura passiva por unidade de comprimento (cm^2/m) em bitolas padronizadas da NBR 7480: 1996 (EB-3)

Espaçamento (cm)	Bitolas ϕ (mm)							
	3,4 ⁽¹⁾	4,2 ⁽¹⁾	5	6,3	8	10	12,5	16
7,0	1,30	1,98	2,81	4,45	7,18	11,22	17,53	28,72
7,5	1,21	1,85	2,62	4,16	6,70	10,47	16,36	26,81
8,0	1,13	1,73	2,45	3,90	6,28	9,82	15,34	25,13
8,5	1,07	1,63	2,31	3,67	5,91	9,24	14,44	23,65
9,0	1,01	1,54	2,18	3,46	5,59	8,73	13,64	22,34
9,5	0,96	1,46	2,07	3,28	5,29	8,27	12,92	21,16
10,0	0,91	1,39	1,96	3,12	5,03	7,85	12,27	20,11
11,0	0,83	1,26	1,79	2,83	4,57	7,14	11,16	18,28
12,0	0,76	1,15	1,64	2,60	4,19	6,55	10,23	16,76
13,0	0,70	1,07	1,51	2,40	3,87	6,04	9,44	15,47
14,0	0,65	0,99	1,40	2,23	3,59	5,61	8,77	14,36
15,0	0,61	0,92	1,31	2,08	3,35	5,24	8,18	13,40
16,0	0,57	0,87	1,23	1,95	3,14	4,91	7,67	12,57
16,5	0,55	0,84	1,19	1,89	3,05	4,76	7,44	12,19
17,0	0,53	0,81	1,16	1,83	2,96	4,62	7,22	11,83
18,0	0,50	0,77	1,09	1,73	2,79	4,36	6,82	11,17
19,0	0,48	0,73	1,03	1,64	2,65	4,13	6,46	10,58
20,0	0,45	0,69	0,98	1,56	2,51	3,93	6,14	10,05
21,0	0,43	0,66	0,94	1,48	2,39	3,74	5,84	9,57
22,0	0,41	0,63	0,89	1,42	2,28	3,57	5,58	9,14
23,0	0,39	0,60	0,85	1,36	2,19	3,41	5,34	8,74
24,0	0,38	0,58	0,82	1,30	2,09	3,27	5,11	8,38
25,0	0,36	0,55	0,79	1,25	2,01	3,14	4,91	8,04
26,0	0,35	0,53	0,76	1,20	1,93	3,02	4,72	7,73
27,0	0,34	0,51	0,73	1,15	1,86	2,91	4,55	7,45
28,0	0,32	0,49	0,70	1,11	1,80	2,81	4,38	7,18
29,0	0,31	0,48	0,68	1,07	1,73	2,71	4,23	6,93
30,0	0,30	0,46	0,65	1,04	1,68	2,62	4,09	6,70
31,0	0,29	0,45	0,63	1,01	1,62	2,53	3,96	6,49
32,0	0,28	0,43	0,61	0,97	1,57	2,45	3,83	6,28
33,0	0,28	0,42	0,60	0,94	1,52	2,38	3,72	6,09

⁽¹⁾ apenas para o aço CA-60

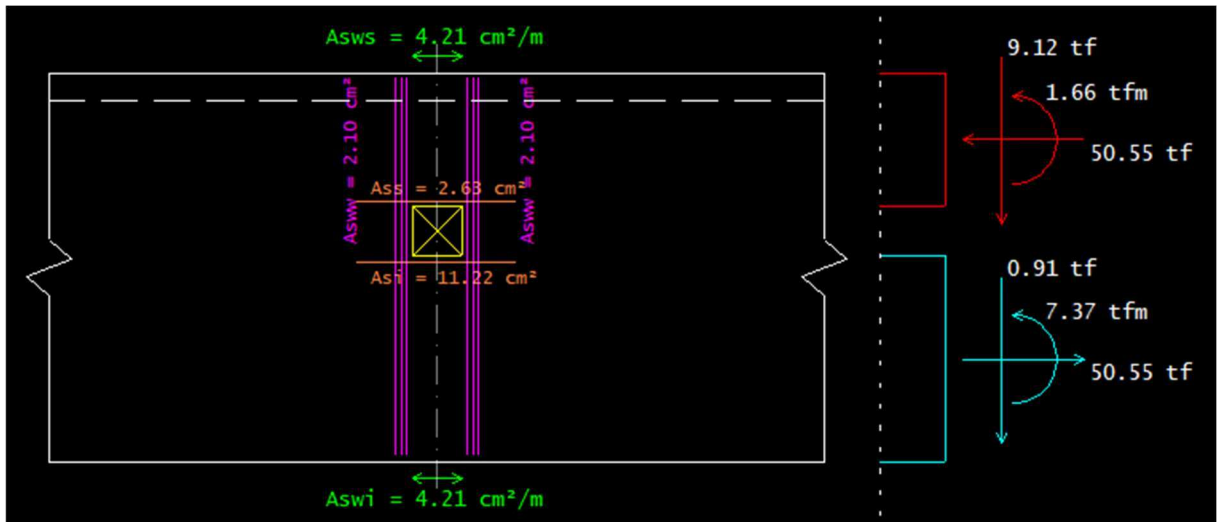
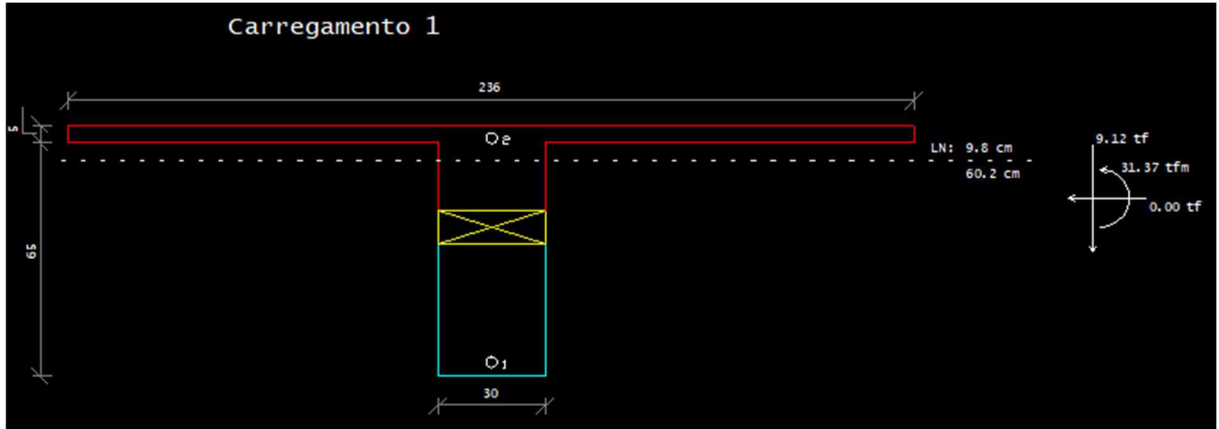
APÊNDICE A – CÁLCULO DAS FURAÇÕES

Nesse apêndice é apresentado o cálculo individual de cada furo contido na viga V22, sendo que esse foi realizado através de uma planilha elaborada pela autora.

Em seguida, foram inseridas as representações gráficas do programa TQS, com o objetivo de comparação nos resultados obtidos.

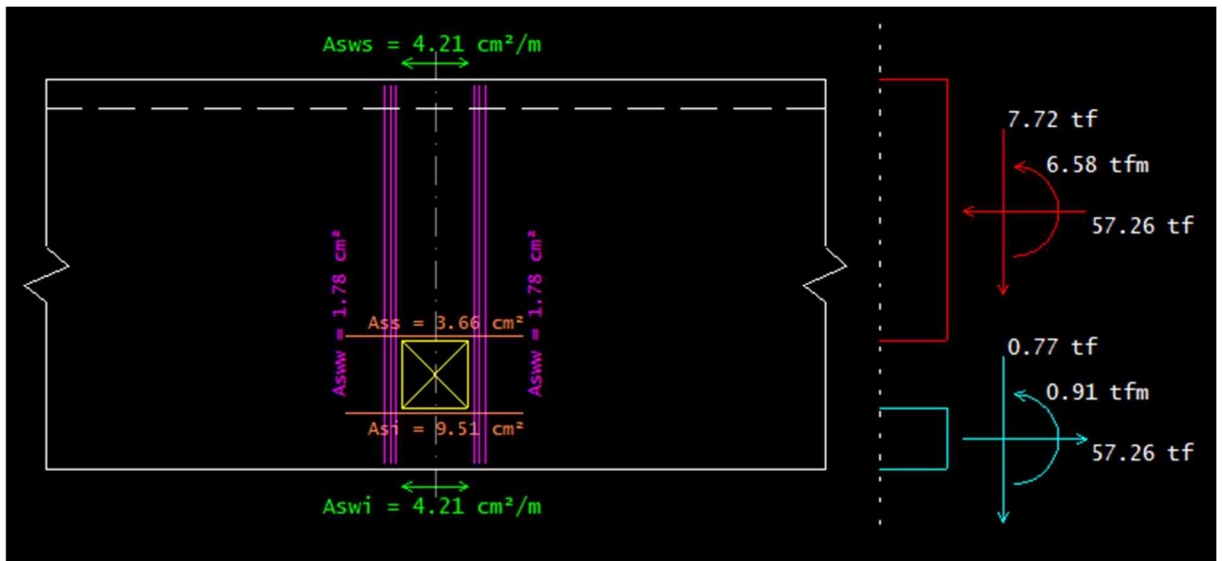
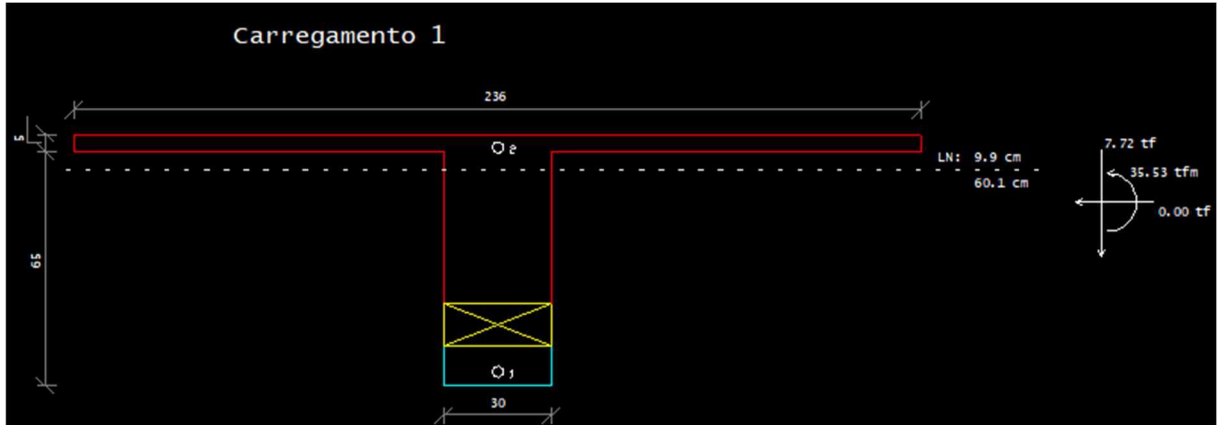
Dados da furação F1

<i>Dados de entrada da furação</i>			
Nomenclatura:	F1		
Altura Seção S ₁ (cm):	24,0	Diâmetro / Largura Furo (cm):	9,0
Altura Seção S ₂ (cm):	37,0	Momento Fletor Característico - M _k (kN.m):	224,08
Altura LN (cm):	1,04	Esforços Cortantes Característicos - Q _k (kN):	65,12
Resistência Característica à Compressão (MPa)	40,00	Carga Distribuída Característica - q _k (kN):	17,5
Resistência Característica da Armadura (MPa)	500,0	Largura da viga (cm)	30,0
Distância d' (cm)	4,0	Altura da viga (cm)	70,0
<i>Dados de saída da furação</i>			
Momento Fletor de Cálculo - M _d (kN.m):	313,7	Distância a (cm)	4,5
Esforços Cortantes de Cálculo - Q _d (kN):	91,2	M _{1d} (kN.m)	4,13
Carga Distribuída de Cálculo - q _d (kN):	24,5	M _{2d} (kN.m)	0,41
Aplicação da força de compressão D _d - 0,4x (cm)	0,42	Força de Compressão - D _d (kN)	478,4
Braço de alavanca - z (cm)	65,6	Força de Tração - Z _d (kN)	478,4
Excentricidade Seção S ₁ (cm):	11,58	Momento Fletor de Cálculo da Seção 1 - M _{s1d} (kN.m)	59,5
Excentricidade Seção S ₂ (cm):	14,5	Momento Fletor de Cálculo da Seção 2 - M _{s2d} (kN.m)	69,8
<i>Áreas de aço da furação</i>			
u _{S1}	0,23	u _{S1}	0,12
u _{S2}	0,15	u _{S2}	0,06
ω _{S1}	0,09	ω _{S2}	0,28
A _{s,min,S1} (I) (cm ²)	1,65	A _{s,min,S2} (I) (cm ²)	1,65
A _{s,min,S1} (II) (cm ²)	2,88	A _{s,min,S2} (II) (cm ²)	4,44
A _{s,total,S1} (cm ²)	4,26	A _{s,total,S2} (cm ²)	20,42
A _{s,bordo,S1} (cm ²)	2,13	A _{s,bordo,S2} (cm ²)	10,21
V _{sd} (kN)	91,2	V _{Rd2,1} (kN)	388,8
V _{RI,pmin,S1} (kN)	96,30	V _{RI,pmin,S2} (kN)	158,89
V _{cs1} (kN)	63,2	V _{cs2} (kN)	104,2
V _{swS1} (kN)	28,0	V _{swS2} (kN)	0,00
A _{sw/ss1} (cm ² /m)	3,58	A _{sw/ss2} (cm ² /m)	0,00
A _{sw,min} (cm ² /m)	4,21	A _{sup} (cm ²)	2,10
Φ _{s1} (mm)	12,5	Φ _{s2} (mm)	20,0
η ₁	2,25	η ₂	1,00
η ₃	1,00	f _{ctd} (cm)	1,75
l _{b,s1} (cm)	34,4	l _{b,s2} (cm)	55,1



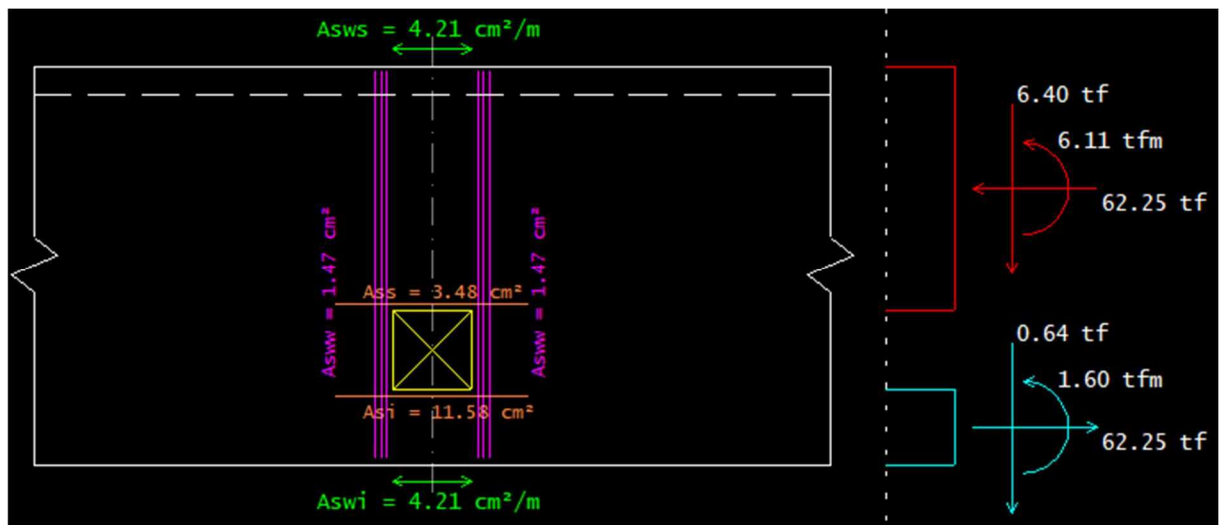
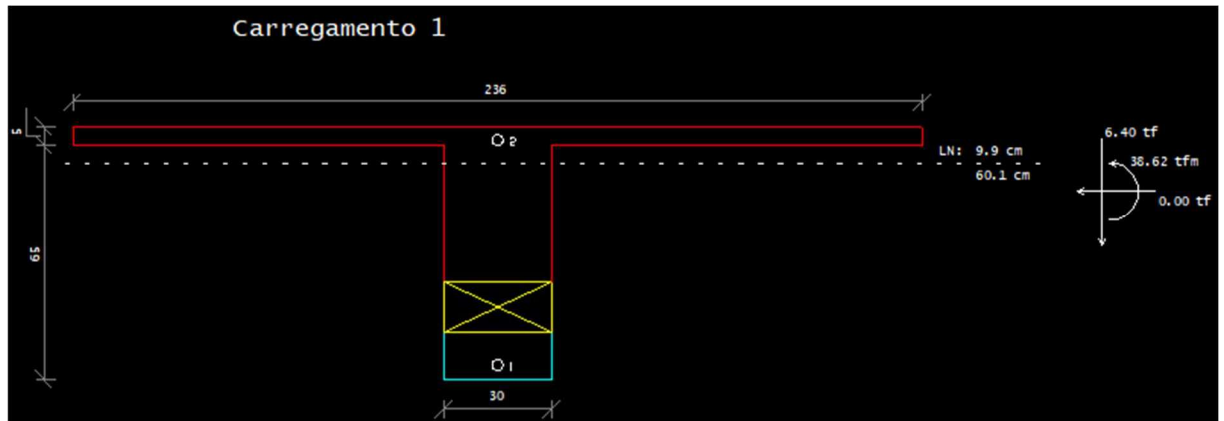
Dados da furação F2

<i>Dados de entrada da furação</i>			
Nomenclatura:	F2		
Altura Seção S ₁ (cm):	47,0	Diâmetro / Largura Furo (cm):	12,0
Altura Seção S ₂ (cm):	11,0	Momento Fletor Característico - M _k (kN.m):	253,76
Altura LN (cm):	1,18	Esforços Cortantes Característicos - Q _k (kN):	55,13
Resistência Característica à Compressão (MPa)	40,00	Carga Distribuída Característica - q _k (kN):	17,5
Resistência Característica da Armadura (MPa)	500,0	Largura da viga (cm)	30,0
Distância d' (cm)	4,0	Altura da viga (cm)	70,0
<i>Dados de saída da furação</i>			
Momento Fletor de Cálculo - M _d (kN.m):	355,3	Distância a (cm)	6,0
Esforços Cortantes de Cálculo - Q _d (kN):	77,2	M _{1d} (kN.m)	4,67
Carga Distribuída de Cálculo - q _d (kN):	24,5	M _{2d} (kN.m)	0,46
Aplicação da força de compressão D _d - 0,4x (cm)	0,47	Força de Compressão - D _d (kN)	542,2
Braço de alavanca - z (cm)	65,5	Força de Tração - Z _d (kN)	542,2
Excentricidade Seção S ₁ (cm):	23,03	Momento Fletor de Cálculo da Seção 1 - M _{s1d} (kN.m)	129,5
Excentricidade Seção S ₂ (cm):	1,5	Momento Fletor de Cálculo da Seção 2 - M _{s2d} (kN.m)	8,6
<i>Áreas de aço da furação</i>			
u _{S1}	0,13	u _{S1}	0,07
u _{S2}	0,58	u _{S2}	0,08
ω _{S1}	0,04	ω _{S2}	0,77
A _{s,min,S1} (I) (cm ²)	1,87	A _{s,min,S2} (I) (cm ²)	1,87
A _{s,min,S1} (II) (cm ²)	5,64	A _{s,min,S2} (II) (cm ²)	1,32
A _{s,total,S1} (cm ²)	3,71	A _{s,total,S2} (cm ²)	16,70
A _{s,bordo,S1} (cm ²)	1,85	A _{s,bordo,S2} (cm ²)	8,35
V _{sd} (kN)	77,2	V _{Rd2,1} (kN)	835,9
V _{RI,pmin,S1} (kN)	207,04	V _{RI,pmin,S2} (kN)	33,70
V _{cs1} (kN)	135,8	V _{cs2} (kN)	22,1
V _{swS1} (kN)	0,0	V _{swS2} (kN)	0,00
A _{sw/ss1} (cm ² /m)	0,00	A _{sw/ss2} (cm ² /m)	0,00
A _{sw,min} (cm ² /m)	4,21	A _{sup} (cm ²)	1,78
Φ _{s1} (mm)	16,0	Φ _{s2} (mm)	20,0
η ₁	2,25	η ₂	1,00
η ₃	1,00	f _{ctd} (cm)	1,75
l _{b,s1} (cm)	44,1	l _{b,s2} (cm)	55,1



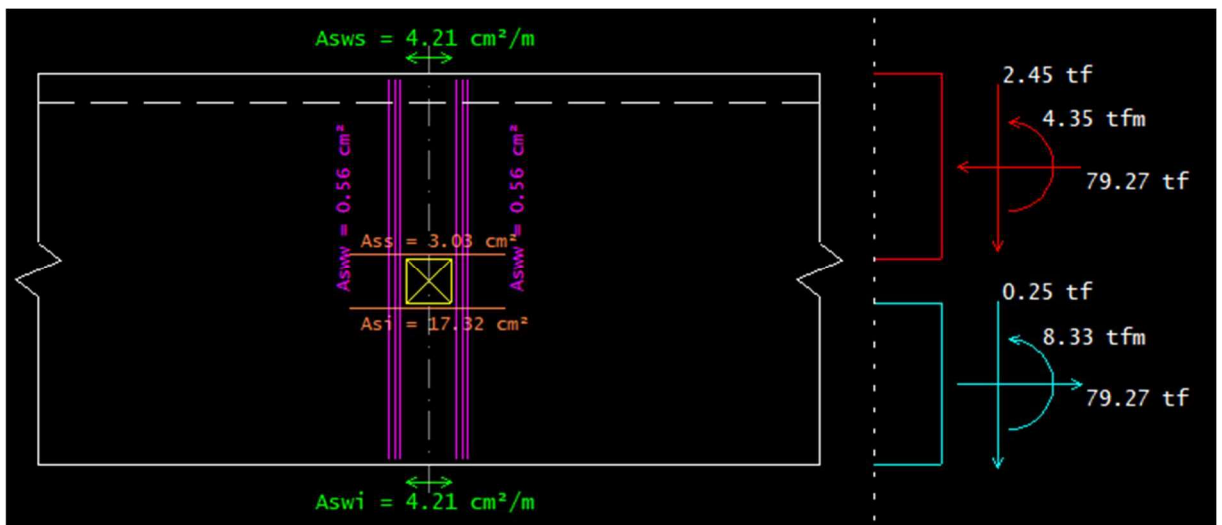
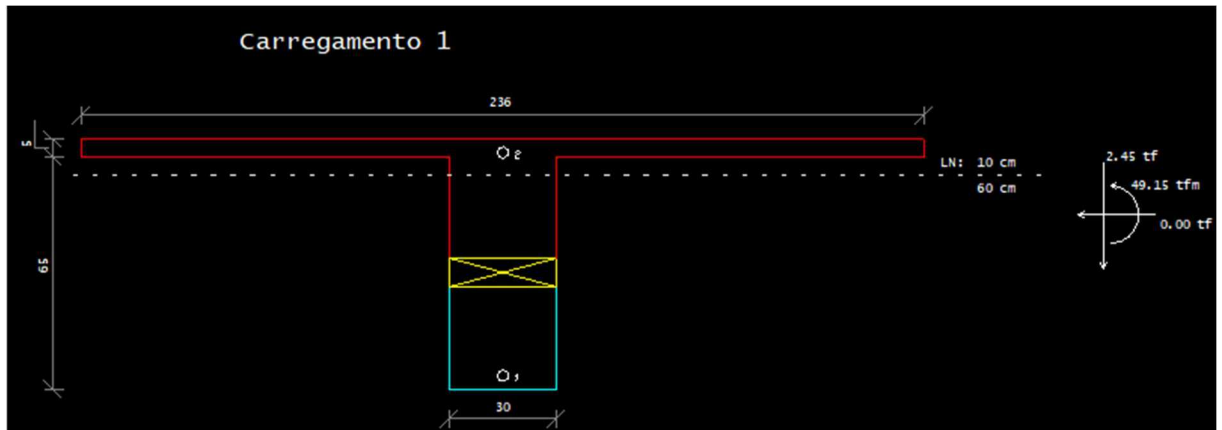
Dados da furação F3

Dados de entrada da furação			
Nomenclatura:	F3		
Altura Seção S ₁ (cm):	43,0	Diâmetro / Largura Furo (cm):	14,0
Altura Seção S ₂ (cm):	13,0	Momento Fletor Característico - M _k (kN.m):	275,82
Altura LN (cm):	1,29	Esforços Cortantes Característicos - Q _k (kN):	45,70
Resistência Característica à Compressão (MPa)	40,00	Carga Distribuída Característica - q _k (kN):	17,5
Resistência Característica da Armadura (MPa)	500,0	Largura da viga (cm)	30,0
Distância d' (cm)	4,0	Altura da viga (cm)	70,0
Dados de saída da furação			
Momento Fletor de Cálculo - M _d (kN.m):	386,2	Distância a (cm)	7,0
Esforços Cortantes de Cálculo - Q _d (kN):	64,0	M _{1d} (kN.m)	4,54
Carga Distribuída de Cálculo - q _d (kN):	24,5	M _{2d} (kN.m)	0,45
Aplicação da força de compressão D _d - 0,4x (cm)	0,52	Força de Compressão - D _d (kN)	589,7
Braço de alavanca - z (cm)	65,5	Força de Tração - Z _d (kN)	589,7
Excentricidade Seção S ₁ (cm):	20,98	Momento Fletor de Cálculo da Seção 1 - M _{s1d} (kN.m)	128,3
Excentricidade Seção S ₂ (cm):	2,5	Momento Fletor de Cálculo da Seção 2 - M _{s2d} (kN.m)	15,2
Áreas de aço da furação			
u _{S1}	0,16	u _{S1}	0,08
u _{S2}	0,53	u _{S2}	0,10
ω _{S1}	0,05	ω _{S2}	0,77
A _{s,min,S1} (I) (cm ²)	2,03	A _{s,min,S2} (I) (cm ²)	2,03
A _{s,min,S1} (II) (cm ²)	5,16	A _{s,min,S2} (II) (cm ²)	1,56
A _{s,total,S1} (cm ²)	4,24	A _{s,total,S2} (cm ²)	19,61
A _{s,bordo,S1} (cm ²)	2,12	A _{s,bordo,S2} (cm ²)	9,80
V _{sd} (kN)	64,0	V _{Rd2,I} (kN)	758,2
V _{RI,pmin,S1} (kN)	187,78	V _{RI,pmin,S2} (kN)	43,33
V _{cs1} (kN)	123,2	V _{cs2} (kN)	28,4
V _{swS1} (kN)	0,0	V _{swS2} (kN)	0,00
A _{sw/ss1} (cm ² /m)	0,00	A _{sw/ss2} (cm ² /m)	0,00
A _{sw,min} (cm ² /m)	4,21	A _{sup} (cm ²)	1,47
Φ _{s1} (mm)	12,5	Φ _{s2} (mm)	25,0
η ₁	2,25	η ₂	1,00
η ₃	1,00	f _{ctd} (cm)	1,75
l _{b,s1} (cm)	34,4	l _{b,s2} (cm)	68,8



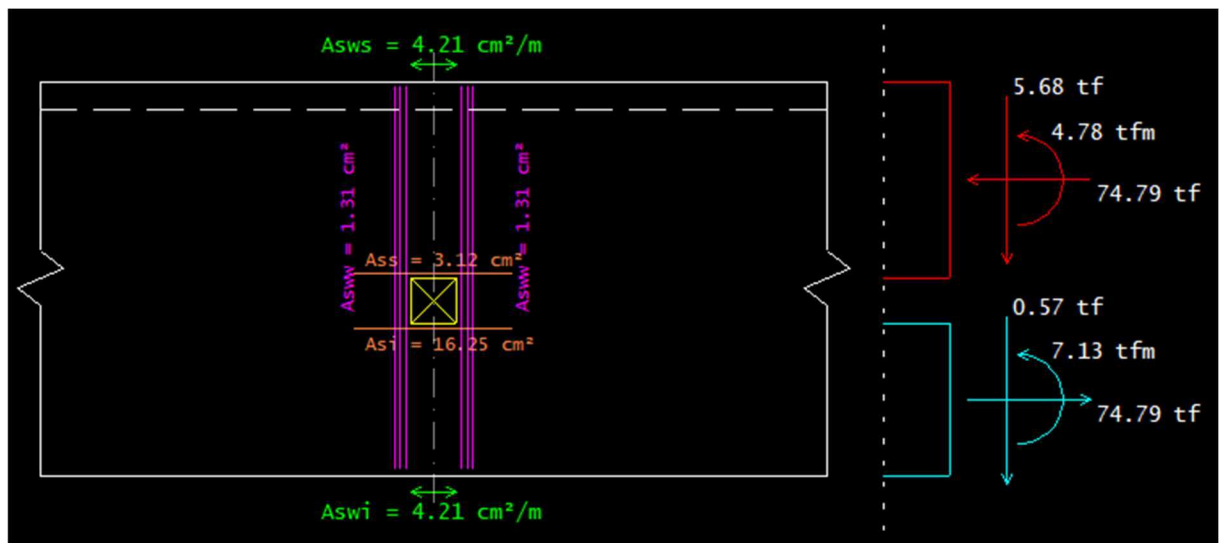
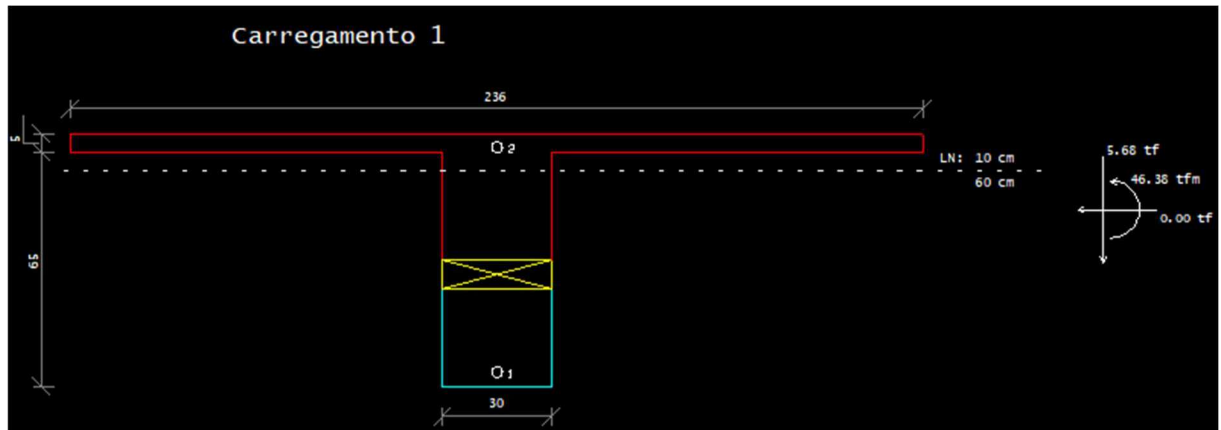
Dados da furação F4

<i>Dados de entrada da furação</i>			
Nomenclatura:	F4		
Altura Seção S ₁ (cm):	33,0	Diâmetro / Largura Furo (cm):	8,0
Altura Seção S ₂ (cm):	29,0	Momento Fletor Característico - M _k (kN.m):	351,08
Altura LN (cm):	1,64	Esforços Cortantes Característicos - Q _k (kN):	17,48
Resistência Característica à Compressão (MPa)	40,00	Carga Distribuída Característica - q _k (kN):	17,5
Resistência Característica da Armadura (MPa)	500,0	Largura da viga (cm)	30,0
Distância d' (cm)	4,0	Altura da viga (cm)	70,0
<i>Dados de saída da furação</i>			
Momento Fletor de Cálculo - M _d (kN.m):	491,5	Distância a (cm)	4,0
Esforços Cortantes de Cálculo - Q _d (kN):	24,5	M _{1d} (kN.m)	1,00
Carga Distribuída de Cálculo - q _d (kN):	24,5	M _{2d} (kN.m)	0,10
Aplicação da força de compressão D _d - 0,4x (cm)	0,66	Força de Compressão - D _d (kN)	752,2
Braço de alavanca - z (cm)	65,3	Força de Tração - Z _d (kN)	752,2
Excentricidade Seção S ₁ (cm):	15,84	Momento Fletor de Cálculo da Seção 1 - M _{s1d} (kN.m)	120,2
Excentricidade Seção S ₂ (cm):	10,5	Momento Fletor de Cálculo da Seção 2 - M _{s2d} (kN.m)	79,1
<i>Áreas de aço da furação</i>			
υ _{S1}	0,27	μ _{S1}	0,13
υ _{S2}	0,30	μ _{S2}	0,11
ϖ _{S1}	0,11	ϖ _{S2}	0,56
A _{s,min,S1} (I) (cm ²)	2,60	A _{s,min,S2} (I) (cm ²)	2,60
A _{s,min,S1} (II) (cm ²)	3,96	A _{s,min,S2} (II) (cm ²)	3,48
A _{s,total,S1} (cm ²)	6,83	A _{s,total,S2} (cm ²)	32,02
A _{s,bordo,S1} (cm ²)	3,42	A _{s,bordo,S2} (cm ²)	16,01
V _{sd} (kN)	24,5	V _{Rd2,I} (kN)	563,8
V _{RI,ρmin,S1} (kN)	139,63	V _{RI,ρmin,S2} (kN)	120,37
V _{cS1} (kN)	91,6	V _{cS2} (kN)	78,9
V _{swS1} (kN)	0,0	V _{swS2} (kN)	0,00
A _{sw/SS1} (cm ² /m)	0,00	A _{sw/SS2} (cm ² /m)	0,00
A _{sw,min} (cm ² /m)	4,21	A _{sup} (cm ²)	0,56
Φ _{s1} (mm)	12,5	Φ _{s2} (mm)	25,0
η ₁	2,25	η ₂	1,00
η ₃	1,00	f _{ctd} (cm)	1,75
l _{b,s1} (cm)	34,4	l _{b,s2} (cm)	68,8



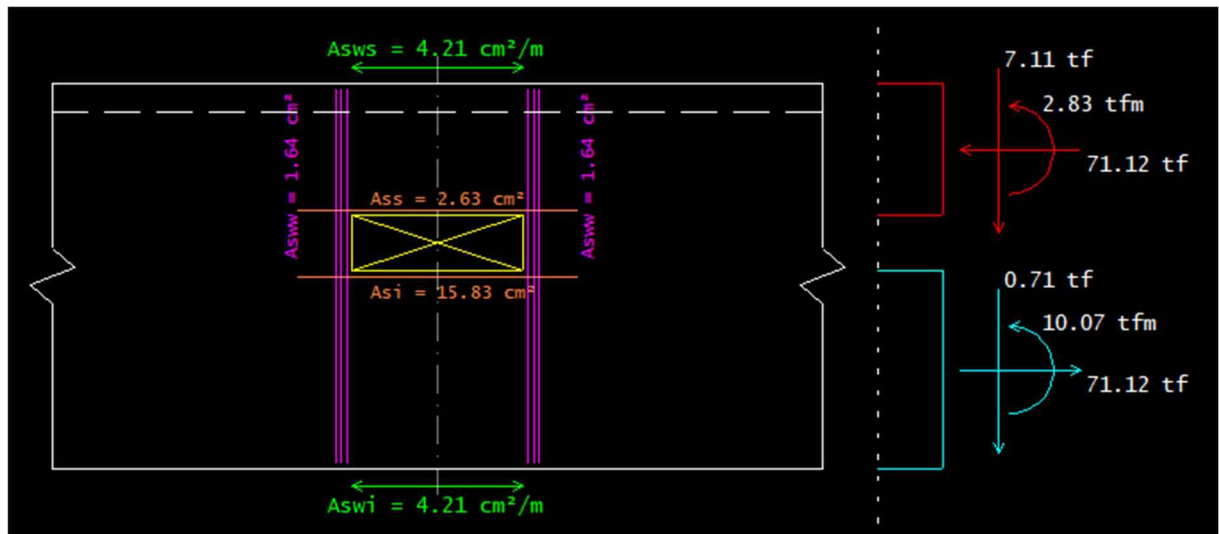
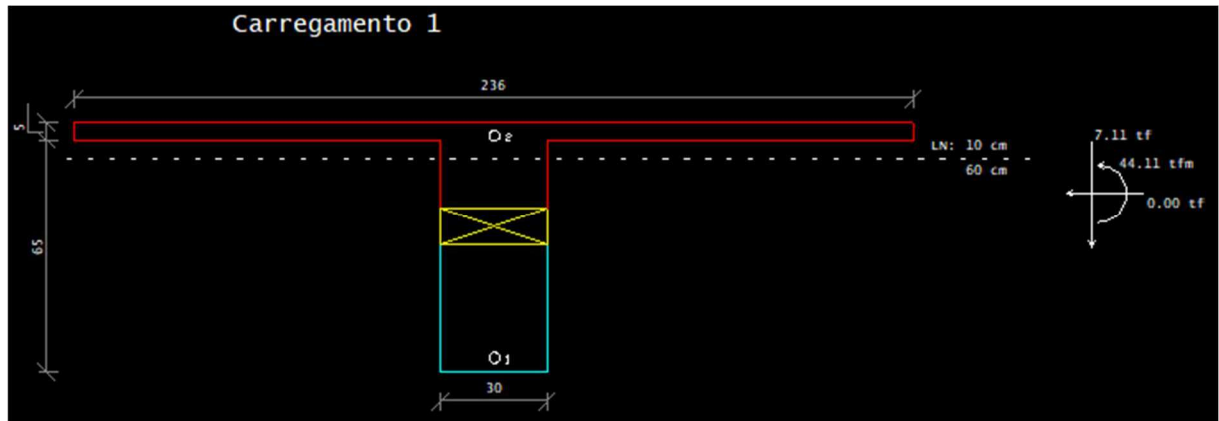
Dados da furação F5

<i>Dados de entrada da furação</i>			
Nomenclatura:	F5		
Altura Seção S ₁ (cm):	35,0	Diâmetro / Largura Furo (cm):	8,0
Altura Seção S ₂ (cm):	27,0	Momento Fletor Característico - M _k (kN.m):	331,28
Altura LN (cm):	1,55	Esforços Cortantes Característicos - Q _k (kN):	40,57
Resistência Característica à Compressão (MPa)	40,00	Carga Distribuída Característica - q _k (kN):	17,5
Resistência Característica da Armadura (MPa)	500,0	Largura da viga (cm)	30,0
Distância d' (cm)	4,0	Altura da viga (cm)	70,0
<i>Dados de saída da furação</i>			
Momento Fletor de Cálculo - M _d (kN.m):	463,8	Distância a (cm)	4,0
Esforços Cortantes de Cálculo - Q _d (kN):	56,8	M _{1d} (kN.m)	2,29
Carga Distribuída de Cálculo - q _d (kN):	24,5	M _{2d} (kN.m)	0,23
Aplicação da força de compressão D _d - 0,4x (cm)	0,62	Força de Compressão - D _d (kN)	709,4
Braço de alavanca - z (cm)	65,4	Força de Tração - Z _d (kN)	709,4
Excentricidade Seção S ₁ (cm):	16,88	Momento Fletor de Cálculo da Seção 1 - M _{s1d} (kN.m)	122,0
Excentricidade Seção S ₂ (cm):	9,5	Momento Fletor de Cálculo da Seção 2 - M _{s2d} (kN.m)	67,6
<i>Áreas de aço da furação</i>			
υ _{S1}	0,24	μ _{S1}	0,12
υ _{S2}	0,31	μ _{S2}	0,11
ϖ _{S1}	0,09	ϖ _{S2}	0,58
A _{s,min,S1} (I) (cm ²)	2,45	A _{s,min,S2} (I) (cm ²)	2,45
A _{s,min,S1} (II) (cm ²)	4,20	A _{s,min,S2} (II) (cm ²)	3,24
A _{s,total,S1} (cm ²)	6,21	A _{s,total,S2} (cm ²)	30,61
A _{s,bordo,S1} (cm ²)	3,11	A _{s,bordo,S2} (cm ²)	15,30
V _{sd} (kN)	56,8	V _{Rd2,I} (kN)	602,6
V _{RI,ρmin,S1} (kN)	149,26	V _{RI,ρmin,S2} (kN)	110,74
V _{cS1} (kN)	97,9	V _{cS2} (kN)	72,6
V _{swS1} (kN)	0,0	V _{swS2} (kN)	0,00
A _{sw/SS1} (cm ² /m)	0,00	A _{sw/SS2} (cm ² /m)	0,00
A _{sw,min} (cm ² /m)	4,21	A _{sup} (cm ²)	1,31
Φ _{s1} (mm)	10,0	Φ _{s2} (mm)	20,0
η ₁	2,25	η ₂	1,00
η ₃	1,00	f _{ctd} (cm)	1,75
l _{b,s1} (cm)	27,5	l _{b,s2} (cm)	55,1



Dados da furação F6

<i>Dados de entrada da furação</i>			
Nomenclatura:	F6		
Altura Seção S ₁ (cm):	24,0	Diâmetro / Largura Furo (cm):	31,0
Altura Seção S ₂ (cm):	36,0	Momento Fletor Característico - M _k (kN.m):	315,05
Altura LN (cm):	1,47	Esforços Cortantes Característicos - Q _k (kN):	50,79
Resistência Característica à Compressão (MPa)	40,00	Carga Distribuída Característica - q _k (kN):	17,5
Resistência Característica da Armadura (MPa)	500,0	Largura da viga (cm)	30,0
Distância d' (cm)	4,0	Altura da viga (cm)	70,0
<i>Dados de saída da furação</i>			
Momento Fletor de Cálculo - M _d (kN.m):	441,1	Distância a (cm)	15,5
Esforços Cortantes de Cálculo - Q _d (kN):	71,1	M _{1d} (kN.m)	11,31
Carga Distribuída de Cálculo - q _d (kN):	24,5	M _{2d} (kN.m)	1,10
Aplicação da força de compressão D _d - 0,4x (cm)	0,59	Força de Compressão - D _d (kN)	674,3
Braço de alavanca - z (cm)	65,4	Força de Tração - Z _d (kN)	674,3
Excentricidade Seção S ₁ (cm):	11,41	Momento Fletor de Cálculo da Seção 1 - M _{s1d} (kN.m)	88,3
Excentricidade Seção S ₂ (cm):	14,0	Momento Fletor de Cálculo da Seção 2 - M _{s2d} (kN.m)	95,5
<i>Áreas de aço da furação</i>			
υ _{S1}	0,33	μ _{S1}	0,18
υ _{S2}	0,22	μ _{S2}	0,09
ω _{S1}	0,21	ω _{S2}	0,45
A _{s,min,S1} (I) (cm ²)	2,33	A _{s,min,S2} (I) (cm ²)	2,33
A _{s,min,S1} (II) (cm ²)	2,88	A _{s,min,S2} (II) (cm ²)	4,32
A _{s,total,S1} (cm ²)	9,94	A _{s,total,S2} (cm ²)	31,58
A _{s,bordo,S1} (cm ²)	4,97	A _{s,bordo,S2} (cm ²)	15,79
V _{sd} (kN)	71,1	V _{Rd2,1} (kN)	388,8
V _{RI,ρmin,S1} (kN)	96,30	V _{RI,ρmin,S2} (kN)	154,08
V _{cs1} (kN)	63,2	V _{cs2} (kN)	101,1
V _{swS1} (kN)	7,9	V _{swS2} (kN)	0,00
A _{sw/SS1} (cm ² /m)	1,01	A _{sw/SS2} (cm ² /m)	0,00
A _{sw,min} (cm ² /m)	4,21	A _{sup} (cm ²)	1,64
Φ _{s1} (mm)	12,5	Φ _{s2} (mm)	25,0
η ₁	2,25	η ₂	1,00
η ₃	1,00	f _{ctd} (cm)	1,75
l _{b,s1} (cm)	34,4	l _{b,s2} (cm)	68,8



Dados da furação F7

<i>Dados de entrada da furação</i>			
Nomenclatura:	F7		
Altura Seção S ₁ (cm):	38,0	Diâmetro / Largura Furo (cm):	36,0
Altura Seção S ₂ (cm):	18,0	Momento Fletor Característico - M _k (kN.m):	281,68
Altura LN (cm):	1,32	Esforços Cortantes Característicos - Q _k (kN):	71,98
Resistência Característica à Compressão (MPa)	40,00	Carga Distribuída Característica - q _k (kN):	17,5
Resistência Característica da Armadura (MPa)	500,0	Largura da viga (cm)	30,0
Distância d' (cm)	4,0	Altura da viga (cm)	70,0
<i>Dados de saída da furação</i>			
Momento Fletor de Cálculo - M _d (kN.m):	394,4	Distância a (cm)	18,0
Esforços Cortantes de Cálculo - Q _d (kN):	100,8	M _{1d} (kN.m)	18,53
Carga Distribuída de Cálculo - q _d (kN):	24,5	M _{2d} (kN.m)	1,81
Aplicação da força de compressão D _d - 0,4x (cm)	0,53	Força de Compressão - D _d (kN)	602,3
Braço de alavanca - z (cm)	65,5	Força de Tração - Z _d (kN)	602,3
Excentricidade Seção S ₁ (cm):	18,47	Momento Fletor de Cálculo da Seção 1 - M _{s1d} (kN.m)	129,8
Excentricidade Seção S ₂ (cm):	5,0	Momento Fletor de Cálculo da Seção 2 - M _{s2d} (kN.m)	31,9
<i>Áreas de aço da furação</i>			
υ _{S1}	0,18	μ _{S1}	0,10
υ _{S2}	0,39	μ _{S2}	0,11
ϖ _{S1}	0,03	ϖ _{S2}	0,67
A _{s,min,S1} (I) (cm ²)	2,08	A _{s,min,S2} (I) (cm ²)	2,08
A _{s,min,S1} (II) (cm ²)	4,56	A _{s,min,S2} (II) (cm ²)	2,16
A _{s,total,S1} (cm ²)	1,87	A _{s,total,S2} (cm ²)	23,78
A _{s,bordo,S1} (cm ²)	0,94	A _{s,bordo,S2} (cm ²)	11,89
V _{sd} (kN)	100,8	V _{Rd2,I} (kN)	661,0
V _{RI,ρmin,S1} (kN)	163,71	V _{RI,ρmin,S2} (kN)	67,41
V _{cs1} (kN)	107,4	V _{cs2} (kN)	44,2
V _{swS1} (kN)	0,0	V _{swS2} (kN)	0,00
A _{sw/SS1} (cm ² /m)	0,00	A _{sw/SS2} (cm ² /m)	0,00
A _{sw,min} (cm ² /m)	4,21	A _{sup} (cm ²)	2,32
Φ _{s1} (mm)	12,5	Φ _{s2} (mm)	20,0
η ₁	2,25	η ₂	1,00
η ₃	1,00	f _{ctd} (cm)	1,75
l _{b,s1} (cm)	34,4	l _{b,s2} (cm)	55,1

