



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Júlia Pires Silva

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA TRELIÇADO DE MEZANINO
EM PERFIS TUBULARES UTILIZANDO A LIGAÇÃO TIPO
LUVA**

Ouro Preto

2024

Júlia Pires Silva

Avaliação de um sistema treliçado de mezanino em perfis tubulares utilizando a
ligação tipo luva

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. D.Sc. Arlene Maria Cunha Sarmanho – UFOP

Ouro Preto

2024



FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlia Pires Silva

Avaliação de um sistema treliçado de mezanino em perfis tubulares utilizando a ligação tipo luva

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil

Aprovada em 21 de outubro de 2024

Membros da banca

Profa. D.Sc. Arlene Maria Cunha Sarmanho - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. D.Sc. Gabriel Vieira Nunes - Membro - (Instituto Federal de Minas Gerais)
D.Sc. Matheus Miranda de Oliveira - Membro - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Profa. Arlene Maria Cunha Sarmanho, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/05/2025



Documento assinado eletronicamente por **Arlene Maria Cunha Sarmanho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/05/2025, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0914168** e o código CRC **46487FOA**.

Dedico este trabalho aos meus pais,
Sérgio e Maria Aparecida, às minhas avós
Cecília e Elza e aos meus avôs (In Memoriam)
José e Carlos Roberto.

AGRADECIMENTOS

Com a conclusão dessa jornada, gostaria de agradecer primeiramente a Deus por abençoar tanto minha vida e me permitir chegar até aqui. Agradeço aos meus pais, Maria Aparecida e Sérgio, por não medirem esforços para que eu realize meus sonhos. Vocês são minha base e meu exemplo, tudo isso é por vocês. Às minhas avós, Elza e Cecília, por todas as orações e carinho. À tia Maria do Carmo, pelos conselhos e apoio de sempre. A toda Família Pires e Família Silva, por torcerem por mim direta ou indiretamente. Ao Mateus, por diariamente me incentivar e acreditar tanto em mim, você é um presente na minha vida.

Agradeço os amigos da Civil, em especial Jaderson, Rafael, Pedro e Lucas, pela parceria nos estudos. À República Minamora, por ser minha eterna casa, minha trajetória não faria sentido se não tivesse vocês no meu caminho.

Agradeço à CSN, ARC Ingenieria, Fundação Gorceix e ao PET Civil pelas portas abertas, onde tive experiências inesquecíveis, fundamentais no meu aprendizado e evolução pessoal e profissional. Ao FNDE, pelo apoio financeiro nos meus 2 anos de colaboração para o grupo PET.

Agradeço a minha orientadora Arlene, pela confiança e pela oportunidade de realizar esse trabalho. Obrigada pela sua atenção e tempo que foi dedicado para o aprimoramento do meu aprendizado.

Por fim, agradeço à UFOP, à Escola de Minas e o Departamento de Engenharia Civil, pelo ensino de qualidade. A todos os professores e técnicos que tornaram isso possível.

RESUMO

O uso de perfis tubulares na construção civil tem crescido de forma expressiva, sobretudo devido à sua alta eficiência estrutural, com destaque para projetos que exigem vencer grandes vãos. A fim de otimizar a fabricação, facilitar o transporte e diminuir o custo da obra, os perfis tubulares são divididos em segmentos de menores tamanhos, preferencialmente com comprimentos padronizados. Dessa forma, surge a necessidade de emendas de ligação para unir um perfil a outro, garantindo a capacidade de suportar as forças aplicadas sem comprometer o desempenho da estrutura. Assim, foi desenvolvida uma tipologia de ligação chamada de ligação luva, composta por perfis tubulares de aço com seção circular, desenvolvida a partir de pesquisas teóricas, experimentais e numéricas, no âmbito do PROPEC (Pesquisa de Pós Graduação em Engenharia Civil) da Escola de Minas da UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto). A ligação dos perfis é realizada utilizando-se um perfil adicional de menor diâmetro posicionado internamente ao perfil principal, e conectados por meio de parafusos passantes. Desse modo, este trabalho tem como objetivo, desenvolver e dimensionar um sistema treliçado utilizando perfis tubulares circulares de aço, empregando a ligação luva como elemento de emenda entre as barras. A estrutura global corresponde a um mezanino que será executado para suportar uma sobrecarga correspondente a um estoque de uma loja de tintas, em que as vigas são formadas por treliças. A modelagem 3D da estrutura foi realizada no *software* TEKLA Structures. Os esforços solicitantes foram obtidos no dimensionamento da estrutura com o *software* Ftool. A capacidade resistente e o dimensionamento do sistema treliçado foi avaliada de acordo com os possíveis modos de falha apresentados na literatura e em prescrições normativas. Os resultados obtidos evidenciaram que o uso da ligação luva é uma solução viável para os módulos treliçados estudados, comprovando a viabilidade da aplicação em seu uso estrutural.

Palavras-chaves: Estruturas de aço; Perfil tubular circular; Ligação luva; Ligação parafusada; Ligações de emenda; Sistema treliçado.

ABSTRACT

The use of tubular profiles in civil construction has grown significantly, primarily due to their high structural efficiency, with emphasis on projects that require spanning large distances. To optimize manufacturing, facilitate transportation, and reduce construction costs, tubular profiles are divided into smaller segments, preferably with standardized lengths. As a result, there is a need for connection joints to unite one profile to another, ensuring the capacity to withstand applied forces without compromising the performance of the structure. A type of connection, called a sleeve connection, was developed, consisting of circular steel tubular profiles. This connection was developed through theoretical, experimental, and numerical research within the scope of PROPEC (Postgraduate Research in Civil Engineering) at the Escola de Minas at UFOP (Federal University of Ouro Preto). The profiles are connected using an additional smaller diameter profile positioned internally to the main profile, and they are joined by through bolts. Thus, this work aims to develop and design a truss system using steel circular tubular profiles, employing the sleeve connection as the joining element between the bars. The overall structure corresponds to a mezzanine that will be built to support the load of a paint store's stockroom, with trusses forming the beams. The 3D modeling of the structure was performed in the TEKLA Structures software. The required forces were obtained in the dimensioning of the structure using Ftool software. The load-bearing capacity and dimensioning of the truss system were evaluated according to possible failure modes presented in the literature and normative prescriptions. The results showed that the use of the sleeve connection is a viable solution for the studied truss modules, proving its applicability for structural use.

Keywords: Steel structures; Circular tubular profile; Sleeve connection; Bolted connection; Joint connections; Truss system.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1:Treliça–Aeroporto de Hamburgo, Alemanha (HAMBURG AIRPORT). < https://www.hamburg-airport.de/en >. | 2 |
| Figura 1.2: Uso de perfis tubulares Arena Corinthians (Revista Projeto, 2014). ... | 3 |
| Figura 1.3: : Uso perfis tubulares Salvador Shopping (AFA ARQ, 2007)..... | 3 |
| Figura 1.4: Ligação flangeada em sistemas treliçados (SAMARRA, 2007). | 5 |
| Figura 2.1 : Características da ligação tipo luva (AMPARO, 2018)..... | 7 |
| Figura 2.2: Representação teórica (a) e prática (b) do arranjo de parafusos alinhados (DA SILVA, 2012)..... | 8 |
| Figura 2.3: Ligação tipo luva com parafusos cruzados a 90°..... | 9 |
| Figura 2.4: Processo de fabricação de tubos sem costura – laminação a quente (ARAÚJO, <i>et al.</i> , 2016)..... | 9 |
| Figura 2.5: Mandil posicionado o centro do bloco e dos rolos (ARAÚJO, <i>et al.</i> , 2016). | 10 |
| Figura 2.6: Ilustração dos espaçamentos s e g entre os furos 1 e 2. (ABNT NBR 8800, 2024) | 13 |
| Figura 2.7: Planificação do tubo para cálculo da ruptura da seção líquida (AMPARO,2018). | 14 |
| Figura 2.8: Esquema do modelo mecânico para flexão no parafuso (AMPARO, 2018). | 18 |
| Figura 2.9: Esquema da influência da força axial na região do furo a partir de uma planificação dos tubos. n=número de parafusos (AMPARO, 2018). | 19 |
| Figura 3.1:Representação da estrutura em 3D..... | 23 |
| Figura 3.2: Demonstração das treliças. | 24 |
| Figura 3.3: Caracterização do modelo 1 do sistema treliçado. | 25 |
| Figura 3.4: Caracterização do modelo 2 do sistema treliçado. | 26 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.5: Caracterização do modelo 3 do sistema treliçado. | 27 |
| Figura 3.6: Ilustração da ligação luva | 28 |
| Figura 3.7: Detalhe ligação luva..... | 28 |
| Figura 3.8 Dimensões forma MF-75 (METFORM)..... | 31 |
| Figura 3.9: Valores dos coeficientes de ponderação das ações (ABNT NBR 8800, 2024). | 33 |
| Figura 3.10: Catálogo de pesos pra tubos circulares sem costura (VALLOUREC S.A, 2023). | 34 |
| Figura 3.11: Estrutura em planta com nomeação para cada treliça..... | 35 |
| Figura 3.12: Representação da área de influência sob a T02. | 36 |
| Figura 3.13: Representação da área de influência sob T01 e T03. | 37 |
| Figura 3.14: Diagramas obtidos para T01 e T03..... | 39 |
| Figura 3.15: Diagramas obtidos para T02..... | 40 |
| Figura 3.16: Diagramas obtidos para T04 e T05..... | 41 |
| Figura 3.17:Valores dos coeficientes de ponderação das resistências (ABNT NBR 8800, 2024)..... | 44 |
| Figura 3.18: Parâmetros e convenções para definição de β (ABNT NBR 16239, 2013). | 46 |
| Figura 3.19: Dimensões e propriedades geométricas de um tubo de seção circular (VALLOUREC)..... | 47 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Formulação para verificação da ligação luva (NETO, 2022)..... | 22 |
| Tabela 2: Parâmetros luva | 29 |
| Tabela 3: Tabela de cargas e vão máximos MF-75 | 30 |
| Tabela 4: Resumo parâmetros para cálculo do carregamento. | 38 |
| Tabela 5: Esforços solicitantes de cálculo para T01 e T03..... | 51 |
| Tabela 6: Esforços solicitantes de cálculo para T04 e T05..... | 51 |
| Tabela 7: Esforços solicitantes de cálculo para T02. | 52 |
| Tabela 8: Verificação das barras | 52 |
| Tabela 9: Propriedades geométricas da luva..... | 53 |
| Tabela 10: Resistência calculada da luva..... | 54 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Objetivo | 5 |
| 1.2 | Justificativa | 6 |
| 2 | Revisão bibliográfica | 7 |
| 2.1 | Ligação tipo luva | 7 |
| 2.2 | Tubos de aço com e sem costura | 9 |
| 2.3 | Barras submetidas à força de tração | 11 |
| 2.3.1 | Escoamento da seção bruta (ESB) | 11 |
| 2.3.2 | Ruptura da seção líquida (RSL) | 11 |
| 2.4 | Cisalhamento do parafuso (CP) | 16 |
| 2.5 | Esmagamento da parede do furo (Ovalização do furo-OF) | 16 |
| 2.6 | Flexão do parafuso | 18 |
| 2.7 | Modos de falha | 21 |
| 3 | Materiais e métodos | 23 |
| 3.1 | A estrutura | 23 |
| 3.2 | Detalhamento | 24 |
| 3.3 | Dimensionamento | 29 |
| 3.3.1 | Laje | 30 |
| 3.3.2 | Combinações de ações | 32 |
| 3.3.3 | Esforços solicitantes | 38 |
| 3.3.4 | Verificação das barras | 41 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.3.5 | Modos de falha da ligação luva..... | 49 |
| 4 | Resultados | 51 |
| 5 | Conclusão | 55 |
| 5.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 56 |
| | Referências..... | 57 |

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias gera um impacto significativo em diversos setores. O mercado das edificações vem acompanhando tais inovações nas execuções de suas obras, principalmente com a introdução de novos sistemas pré-fabricados e a racionalização dos métodos construtivos.

Uma das formas de inovação da construção civil nos últimos anos é a partir do aumento da utilização de estruturas metálicas. Antes da Primeira Guerra Mundial e da crise de 1929, as peças fundidas de aço usadas em muitos tipos de construções eram produzidas na Europa e importadas para o Brasil. A partir desse momento, todas as importações se tornaram impraticáveis e se deu o início da indústria siderúrgica moderna no país (ARAÚJO, *et al.*, 2016). O aço aplicado na construção civil é comumente empregado em edificações de grandes dimensões como galpões industriais, arenas de futebol, supermercados e shoppings. Isso devido à suas características favoráveis no momento da construção como diminuição do peso próprio da estrutura, possibilidade de vencer grandes vãos e eficiência de montagem.

Os perfis de aço podem ser divididos em duas categorias: perfis de seção aberta e perfis de seção fechada ou tubulares. Os perfis de seção aberta englobam formatos como, por exemplo, U, I, H e L (cantoneiras) sendo os mais utilizados mundialmente em razão da facilidade de fabricação e montagem. Já os perfis tubulares, ou de seção fechada, podem ter formatos geométricos variados, como quadrados, circulares ou retangulares, e são fabricados por laminação a quente, conformação a frio ou pela união de perfis abertos (DE OLIVEIRA, 2019).

Os perfis tubulares foram introduzidos em Belo Horizonte, na Usina Integrada do Barreiro, inaugurada pela empresa Mannesmannröhren-Werke em 1954. Na época, a utilização de tubos de aço em construções era irrelevante, porém seu uso passou a ganhar espaço a partir dos anos 2000, com o desenvolvimento de aços tubulares com resistência de 250, 300 e 350 MPa pela empresa Vallourec (ARAÚJO, *et al.*, 2016).

Dentre as razões pelas quais o uso dos perfis tubulares se destaca, pode-se relacionar às suas diversas vantagens, como alta capacidade resistente a cargas axiais e a efeitos combinados. Além disso, ao serem comparados com perfis de seções abertas, demandam menos quantidade de aço em sua composição, e conseqüentemente, reduz os custos. Tais características se sobressaem na utilização em sistemas estruturais treliçados, com aplicabilidade em diversos modelos de organização estrutural. A Figura 1.1 está exemplificado o uso de perfis tubulares de seção circular em um sistema treliçado de cobertura.



Figura 1.1:Treliça–Aeroporto de Hamburgo, Alemanha (HAMBURG AIRPORT).

<<https://www.hamburg-airport.de/en>>.

No Brasil, embora as seções abertas ainda predominem, devido à familiaridade da mão de obra e de projetistas sobre esses perfis, a produção e o uso de perfis tubulares têm aumentado significativamente. Sua aplicação em diversas edificações já é evidente, como ilustrado na Figura 1.2, com o projeto da cobertura da Arena Corinthians, e na Figura 1.3, onde está apresentada a estrutura do Salvador Shopping.



Figura 1.2: Uso de perfis tubulares Arena Corinthians (Revista Projeto, 2014).



Figura 1.3: : Uso perfis tubulares Salvador Shopping (AFA ARQ, 2007).

Além disso, é fundamental destacar a evolução dos estudos e a utilização dos perfis tubulares a partir da publicação da norma brasileira ABNT NBR 16239, em

2013, que estabelece diretrizes específicas para o dimensionamento de estruturas tubulares. Essa norma, intitulada "Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares", foi desenvolvida com base nas formulações do Eurocode 3 (2005): "Design of Steel Structures". A introdução dessa norma representa um avanço significativo na padronização e na segurança das construções, refletindo as melhores práticas internacionais e promovendo uma maior eficiência no uso de perfis tubulares em projetos arquitetônicos e estruturais no Brasil. Isso não apenas facilita na escolha desses perfis em projetos estruturais, mas também contribui para a inovação na construção civil.

Nesse contexto, o uso de perfis circulares em sistemas estruturais de treliças exige a utilização de perfis estruturais com comprimentos elevados, onde os esforços de compressão e tração predominam no dimensionamento. Além disso, de acordo com SAMARRA, 2007, esses perfis propiciam um aspecto de leveza na estrutura principalmente devido às suas elevadas resistências à compressão, torção e esforços combinados. Por isso, a fim de otimizar a fabricação, facilitar o transporte e diminuir o custo da obra, os tubos são divididos em segmentos de menores tamanhos, preferencialmente com comprimentos padronizados. Dessa forma, surge a necessidade de métodos de ligação para unir um tubo a outro, assegurando a capacidade de suportar as forças aplicadas sem comprometer o desempenho da estrutura.

De acordo com a ABNT NBR 16239, 2013, os elementos podem ser conectados em campo a partir da ligação flangeada. Nesse tipo de ligação, os flanges são formados por duas placas metálicas soldadas na extremidade dos tubos. A conexão entre esses tubos é realizada por meio de parafusos. Na Figura 1.4 tem-se um exemplo de utilização de uma ligação flangeada entre perfis tubulares.



Figura 1.4: Ligação flangeada em sistemas treliçados (SAMARRA, 2007).

Com a finalidade de ampliar as opções de ligações para esse tipo de estrutura, uma nova tipologia de ligação entre perfis tubulares vem sendo estudada SILVA,2012, AMPARO,2014, AMPARO,2018 e OLIVEIRA, 2019. Essa ligação, denominada por ligação luva, é feita utilizando-se tubos de menor diâmetro, localizados internamente aos banzo de uma treliça e conectados por meio de parafusos. A ligação luva é desenvolvida, principalmente para atender os princípios de versatilidade e melhorar o desempenho estético da estrutura quando comparada à ligação flangeada.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é avaliar a aplicação de uma tipologia inovadora de ligação chamada "ligação luva", por meio do desenvolvimento de um modelo de um mezanino, a partir de um sistema treliçado que incorpora esse tipo de ligação, seguido pelo dimensionamento e avaliação da resistência da ligação.

1.2 Justificativa

Este trabalho apresenta um estudo de caso utilizando a ligação tipo luva, uma alternativa inovadora para a união de perfis tubulares, com destaque para sua utilização em sistemas treliçados. Além de facilitar o processo de montagem, reduzindo o tempo de instalação e a complexidade das conexões em campo, essa tipologia proporciona um acabamento mais limpo e discreto, contribuindo para uma estética mais agradável e moderna da estrutura. Com isso, busca-se não apenas validar a eficácia da ligação tipo luva em termos de montagem, mas também garantir que a solução apresentada atenda aos requisitos técnicos e de segurança exigidos para suportar as cargas e esforços aplicados durante a vida útil da estrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho é uma continuidade dos estudos iniciados anteriormente por SILVA, 2012, AMPARO, 2014, AMPARO, 2018 e OLIVEIRA 2019. Com o crescimento da utilização de perfis tubulares em obras de estruturas metálicas no Brasil, há uma tendência de aumento nos estudos e pesquisas referentes a esse tema. Em particular, sobre as ligações que podem ser usadas nesse tipo de perfil, apesar da norma brasileira de perfis tubulares abordar diversas tipologias de ligações, para a ligação tipo luva, objeto de estudo principal, não há diretrizes normativas para determinação da capacidade resistente dessa tipologia de ligação.

As ligações, de forma geral, para que possam ser aplicadas com as devidas adequações de segurança, devem apresentar capacidade resistente suficiente para os possíveis modos de falha. Por isso, é importante fazer uma análise quantitativa de verificação relacionada ao seu desempenho estrutural com base nas hipóteses de dimensionamento. Portanto, essa análise será realizada com premissa nas pesquisas já existentes, buscando-se desenvolver e acrescer ao estudo.

2.1 Ligação tipo luva

A ligação proposta é composta por dois tubos, unidas por um tubo interno. O tubo posicionado na parte externa, de maior diâmetro, pode representar os banzos, ou diagonais, de uma treliça. Por outro lado, o tubo interno, de menor diâmetro, é denominado luva. A ligação entre os tubos é feita por meio de parafusos passantes. A Figura 2.1 apresenta as características da ligação tipo luva, e sua respectiva posição em relação ao tubo externo.

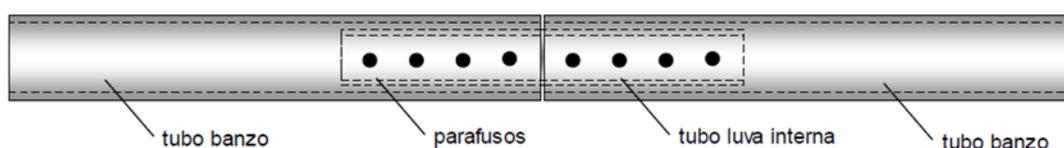
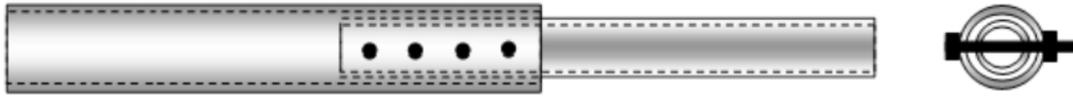


Figura 2.1 : Características da ligação tipo luva (AMPARO, 2018).

Os parafusos podem ser dispostos de diversas maneiras, sendo eles alinhados ou cruzados. No estudo concluído por Silva (2012), o arranjo dos parafusos para a ligação luva foi ordenada de forma alinhada (Figura 2.2 (a)). A Figura 2.2(b) retrata o esquema real ensaiado em laboratório.



(a)



(b)

Figura 2.2: Representação teórica (a) e prática (b) do arranjo de parafusos alinhados (DA SILVA, 2012).

Além do arranjo de furação dos parafusos em linha, nos estudos posteriores feitos por AMPARO (2014), foi proposto para complementar os furos, um arranjo com parafusos cruzados a 90° (Figura 2.3).

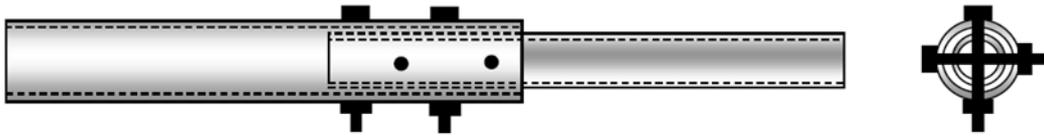


Figura 2.3: Ligação tipo luva com parafusos cruzados a 90°

O objetivo principal é avaliar essa nova tipologia de ligação entre perfis tubulares para utilização em sistemas estruturais treliçados de grandes vãos. Por esta razão, entende-se que essa ligação enfatiza uma das principais características de montagem de estruturas de grandes vãos, a eficiência e rapidez de montagem. A ligação tipo “luva” permite a junção entre os componentes, além de apresentar vantagens estéticas, ao se relacionar à ligação flangeada.

2.2 Tubos de aço com e sem costura

A norma ABNT NBR 16239 (2013) prescreve que os perfis tubulares, também denominados simplesmente tubos, podem ter forma circular ou retangular e podem ser com ou sem costura, fabricados de acordo com as prescrições normativas ABNT NBR 8261, ASTM A500, ASTM A501, entre outras.

Os tubos sem costura são fabricados por meio de um processo de laminação a quente de blocos maciços de aço de seção transversal circular. A Figura 2.4 retrata uma das etapas do processo de laminação do tubo.



Figura 2.4: Processo de fabricação de tubos sem costura – laminação a quente (ARAÚJO, *et al.*, 2016).

A produção dos tubos sem costura inicia-se com o aquecimento dos blocos, em forno rotativo ou vigas caminhantes, normalmente a gás e em seguida eles são transportados para um laminador perfurador (ARAÚJO, *et al.*, 2016). A forma tubular dos blocos se dá a partir do movimento de rotação oblíqua dos rolos contra a ponta de um mandril. A Figura 2.5 apresenta a visão esquemática interna do mandril de laminação do tubo.



Figura 2.5: Mandril posicionado no centro do bloco e dos rolos (ARAÚJO, *et al.*, 2016).

Para a laminação, os blocos devem chegar a uma temperatura final que varia de 1200 a 1300°C e, ao final do processo passam por um leito de resfriamento, até atingir a temperatura ambiente. Esse processo garante aos tubos laminados um baixo nível de tensões residuais e, conseqüentemente, melhora seu rendimento quanto às forças de compressão, devido à distribuição uniforme de massa ao redor de seu centro, mantendo uma temperatura quase constante ao longo de todo o comprimento.

Os tubos com costura são fabricados por meio da conformação mecânica, geralmente a frio, de chapas ou tiras de aço. Em seguida, esses tubos são soldados e moldados de tal maneira que a solda esteja disposta longitudinalmente ou em um padrão helicoidal. Esse processo de calandragem e soldagem geram variações nas tensões residuais ao longo do tubo.

De acordo com Samarra, 2007, a uniformidade das tensões residuais observada nos tubos sem costura conduz a um melhor desempenho do aço em seu emprego estrutural.

2.3 Barras submetidas à força de tração

Dentre as formas mais usuais das barras de aço com seções tubulares submetidas à força axial de tração estão as treliças planas que podem ser encontradas como vigas de piso e de cobertura.

Conforme ARAÚJO, *et al.*, 2016, em uma barra tracionada podem ocorrer os seguintes estados-limites últimos: escoamento da seção bruta (plastificação) e ruptura da seção líquida.

2.3.1 Escoamento da seção bruta (ESB)

A força de tração resistente de cálculo ($N_{t,Rd}$), estabelecida pela ABNT NBR 8800 (2024), referente ao estado limite de escoamento da seção bruta é obtida pela equação (2.1) :

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.1)$$

Onde:

A_g é a área bruta da seção transversal da barra tubular;

f_y é a resistência ao escoamento do aço; e

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência.

2.3.2 Ruptura da seção líquida (RSL)

De acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 8800 (2024), outro estado limite adicional que influencia o dimensionamento de barras sujeitas a esforços de tração é a ruptura da seção líquida. Esse fenômeno ocorre na área de ligação entre as barras.

A força de tração resistente de cálculo ($N_{t,Rd}$), referente ao estado limite de ruptura da seção líquida, conforme a ABNT NBR 8800 (2024) é dada pela equação (2.2):

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (2.2)$$

Onde:

A_e é a área líquida efetiva da seção transversal da barra, determinada conforme a equação (2.3);

f_u é a resistência à ruptura do aço; e

γ_{a2} é o coeficiente de ponderação da resistência.

$$A_e = C_t A_n \quad (2.3)$$

Onde:

A_n é a área líquida da seção;

C_t é o coeficiente de redução da área líquida.

No item 5.2.4 da ABNT NBR 8800 (2024) prescreve a equação (2.4) para cálculo da área líquida da seção (A_n) de uma barra dada por:

$$A_n = \left[b - \sum (d_b + 1,5 \text{ mm}) + \sum \frac{s^2}{4g} \right] t \quad (2.4)$$

Onde:

b é a largura da chapa;

$(d_b + 1,5 \text{ mm})$ é o diâmetro do furo; e

s e g , respectivamente, os espaçamentos longitudinal e transversal entre furos, representados na Figura 2.6.

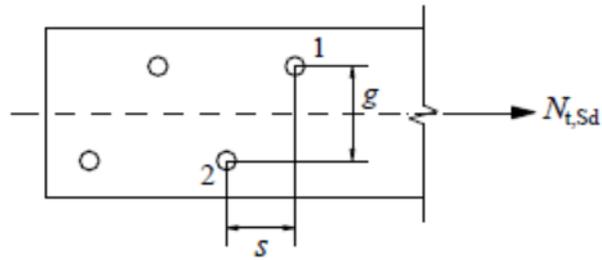
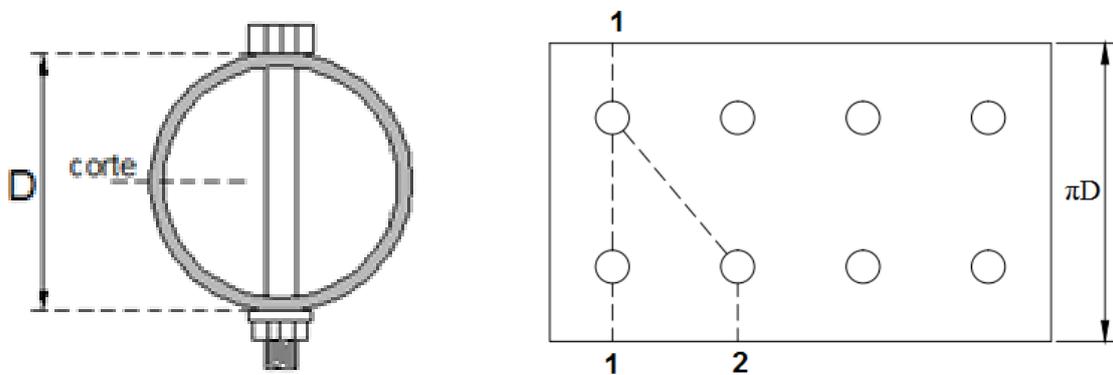
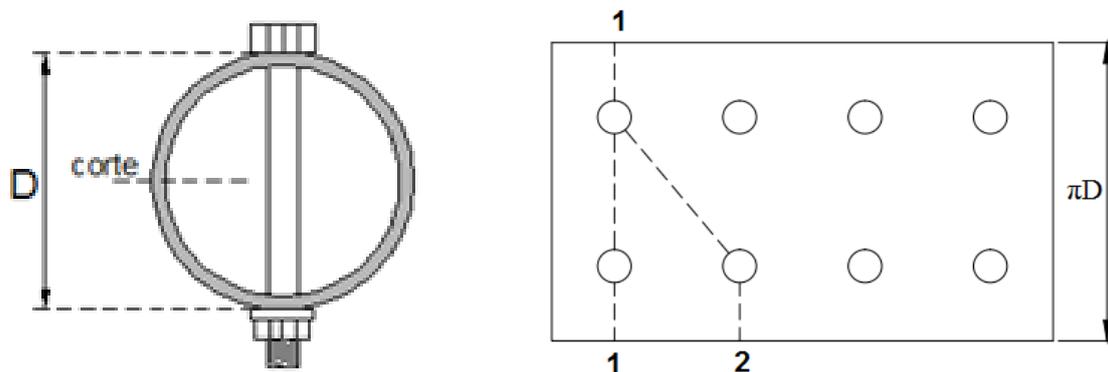


Figura 2.6: Ilustração dos espaçamentos s e g entre os furos 1 e 2. (ABNT NBR 8800, 2024)

De acordo com os estudos de AMPARO,2018, houve a necessidade de adequar a equação (2.4), já que se trata de uma equação empírica e referente a uma barra prismática retangular. Com isso, considerou-se a seção circular do tubo como aberta, de largura igual ao perímetro (πD), como mostra a Figura 2.7. As linhas de ruptura possíveis para as configurações das ligações estão indicadas a partir dos números indicados na figura, sendo 1-1 e 1-2 para parafusos alinhados e 1-1,1-2-2-1 e 1-2-3 para parafusos cruzados.



(a) Parafusos alinhados



(b) Parafusos cruzados

Figura 2.7: Planificação do tubo para cálculo da ruptura da seção líquida (AMPARO,2018).

A análise dos resultados dos experimentos realizados por AMPARO, 2018, permitiu identificar uma relação entre a esbeltez do tubo externo (relação entre o diâmetro externo e a espessura do tubo externo – D_{ext}/t_{ext}) e a esbeltez do tubo interno (relação entre o diâmetro interno e a espessura do tubo interno – D_{int}/t_{ext}), nomeada por esbeltez relativa. A fim de limitar a ocorrência de falha no tubo interno da ligação por ruptura da seção líquida, obteve-se limite mínimo de 1,6.

Foi observado, ainda, que o comprimento da ligação, definido pelas distâncias entre furo e borda e entre furos, além do diâmetro do tubo externo, afeta o valor do coeficiente C_t . A análise dos modelos mostrou que o aumento no número de parafusos na ligação não garante necessariamente um aumento na capacidade resistente, pois, acima de quatro parafusos, a contribuição para a transferência de carga diminui. Assim, o comprimento da ligação deve ser limitado.

A equação da área líquida da seção transversal do tubo, então, pode ser definida pela equação (2.5). A equação (2.6) proposta para o coeficiente de redução da área líquida considera a distribuição de tensões em um comprimento efetivo da linha de parafusos.

$$A_n = A_g - 2dt \quad (2.5)$$

Em que,

A_g é a área bruta da seção transversal do tubo;

d é o diâmetro do furo da ligação (db +folga); e

t é a espessura do tubo.

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l_c} \quad (2.6)$$

Onde,

e_c é a excentricidade da ligação, dada por $D/2$ (D =diâmetro do tubo);

l_c é o comprimento efetivo da ligação, obtido conforme equações (2.7) e (2.7-b).

Para $n < 4$:

Para $n \geq 4$:

$$l_c = l_{f1} + (n - 1)l_{f2} \quad (a) \quad l_c = l_{f1} + 3l_{f2} \quad (b) \quad (2.7)$$

Onde,

n é o número de parafusos na ligação;

l_{f1} é a distância do primeiro furo até a borda do tubo; e

l_{f2} é a distância de furo a furo na ligação.

Ainda com base nos resultados obtidos por AMPARO, 2018, foi observado que a relação entre o comprimento efetivo da ligação e o diâmetro do tubo (l_c/D_{ext}) foi sempre superior a 3,0. Verificou-se, ainda, que a equação apresentou melhores resultados para os modelos em que a relação entre o diâmetro do parafuso e a esbeltez relativa era inferior a 12. Esses valores podem representar limitações para o uso da equação da força resistente de cálculo para a ruptura da seção líquida.

2.4 Cisalhamento do parafuso (CP)

A equação (2.8) determina a força resistente de cálculo para um parafuso de alta resistência ou uma barra redonda rosqueada, segundo a ABNT NBR 8800, 2024:

$$F_{v,Rd} = 2n \frac{\alpha A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (2.8)$$

Onde:

n é o número de parafusos

A_b é a área bruta baseada no diâmetro do parafuso, dada pela equação (2.9);

f_{ub} é a resistência à ruptura do parafuso; e

γ_{a2} é o coeficiente de ponderação de resistência.

$\alpha = 0,4$ quando o plano de corte passa pela rosca

$\alpha = 0,5$ quando plano de corte fora da rosca

$$A_b = 0,25\pi d_b^2 \quad (2.9)$$

Onde:

d_b é o diâmetro do parafuso.

2.5 Esmagamento da parede do furo (Ovalização do furo-OF)

Conforme a NBR 8800:2024, item 6.3.3.3, a expressão que determina a força resistente de cálculo para a pressão de contato nas paredes de um furo, já considerando o rasgamento entre furos consecutivos e entre o furo e a borda, deve ser aplicada quando a deformação no furo sob forças de serviço for um critério de limitação no projeto e pode ser descrita pela expressão (2.10):

$$F_{C,Rd} = \frac{1,2t_l f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,4d_b t f_u}{\gamma_{a2}} \quad (2.10)$$

Em que:

t é a espessura da parte ligada;

l_f é a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre;

d_b é o diâmetro do parafuso;

f_u é a resistência à ruptura do aço da parede tubo;

γ_{a2} é o coeficiente de ponderação de resistência.

No estudo de AMPARO, 2018, foi considerado o modo de falha de ovalização do furo quando a região do tubo, em contato com o parafuso atinge a deformação última do aço do tubo. Assim como no modo de falha por RSL, há uma relação de esbeltez relativa que permite distinguir a ocorrência de falha no tubo externo da ocorrência de falha no tubo interno. Considerar ligações com um limite de esbeltez superior a 1,4 assegura que não haverá falha por ovalização do furo no tubo interno. No entanto, dado que o limite de esbeltez relativa para evitar a ocorrência do modo de RSL no tubo interno é de 1,6, de forma conservadora, pode-se definir $\lambda_{rel} \geq 1,6$ como um parâmetro para garantir que não ocorra falha por ovalização do furo na ligação luva.

A formulação proposta por AMPARO, 2018, após ter avaliado as variações dos modelos experimentados, para a força resistente á pressão de contato na parede do furo é expressa pela equação (2.11):

$$F_{C,Rd} = 2n \frac{d_b t f_u}{\gamma_{a2}}, \text{ para } \lambda_{rel} \geq 1,6 \quad (2.11)$$

Onde:

d_b é o diâmetro do parafuso;

t é a espessura da parede do tubo;

f_u é resistência à ruptura do aço da parede tubo.

2.6 Flexão do parafuso

A ABNT NBR 8800 (2024) somente prevê a verificação do estado limite de flexão para pinos, porém, no caso da ligação, a flexão dos parafusos foi observada significativamente nos estudos realizados por SILVA, 2012, AMPARO, 2014 e AMPARO, 2018. No presente trabalho, a formulação utilizada para verificação desse modo de falha foi a proposta por AMPARO, 2018.

O comportamento do parafuso foi baseado ao de uma viga bi-apoiada submetida à flexão e seu modelo mecânico está representado pela Figura 2.8. No modelo, o contato entre os parafusos e o tubo externo é equivalente ao apoio, enquanto o contato com o tubo interno representa a força concentrada aplicada ao parafuso (f_b) e x corresponde ao braço de alavanca. Além disso, são apresentados os diagramas de esforço cortante (DEC) e de momento fletor (DMF) do parafuso, onde V é o esforço cortante e M o momento fletor.

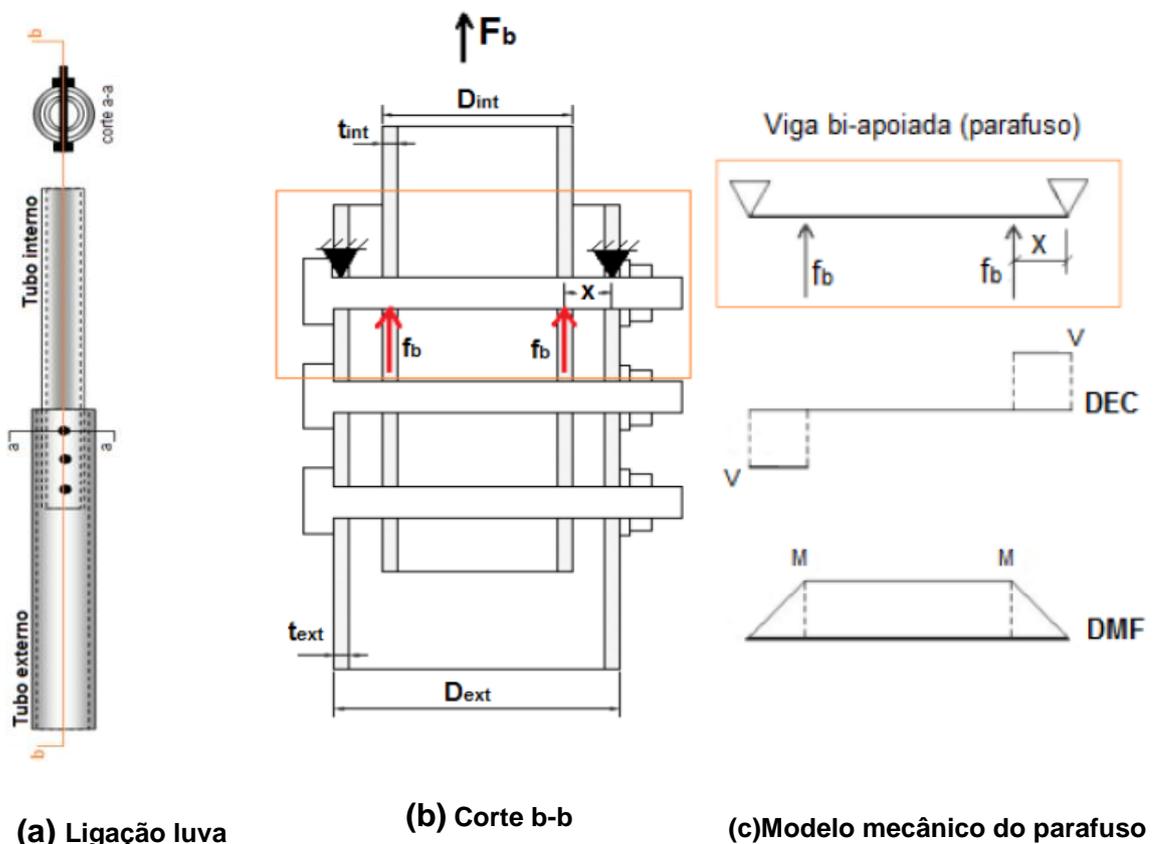


Figura 2.8: Esquema do modelo mecânico para flexão no parafuso (AMPARO, 2018).

A partir dos experimentos realizados por AMPARO,2018, foi constatado que o número de parafusos influencia significativamente os resultados e, por isso, deve ser considerado como um parâmetro na equação. A carga de tração total (F_b) aplicada na ligação luva, que é capaz de gerar flexão nos parafusos, é distribuída ao longo da seção transversal do tubo, cujo comprimento é igual ao perímetro (πD), obtendo-se a taxa de distribuição de força por unidade de comprimento. Em seguida, é necessário levar em consideração a distribuição da força responsável pela flexão do parafuso, f_b , em uma área de influência próxima aos furos. Observou-se que essa distribuição está diretamente relacionada à quantidade de parafusos na ligação. Para ligações com 3 ou 4 parafusos, a área de influência é definida como três vezes o diâmetro do furo ($3d$), enquanto para ligações com 5 ou 6 parafusos, a área de influência é equivalente a três vezes e meia o diâmetro do furo ($3,5d$). A Figura 2.9 apresenta a descrição da influência da força axial para parafusos dispostos em linha em cada uma das situações.

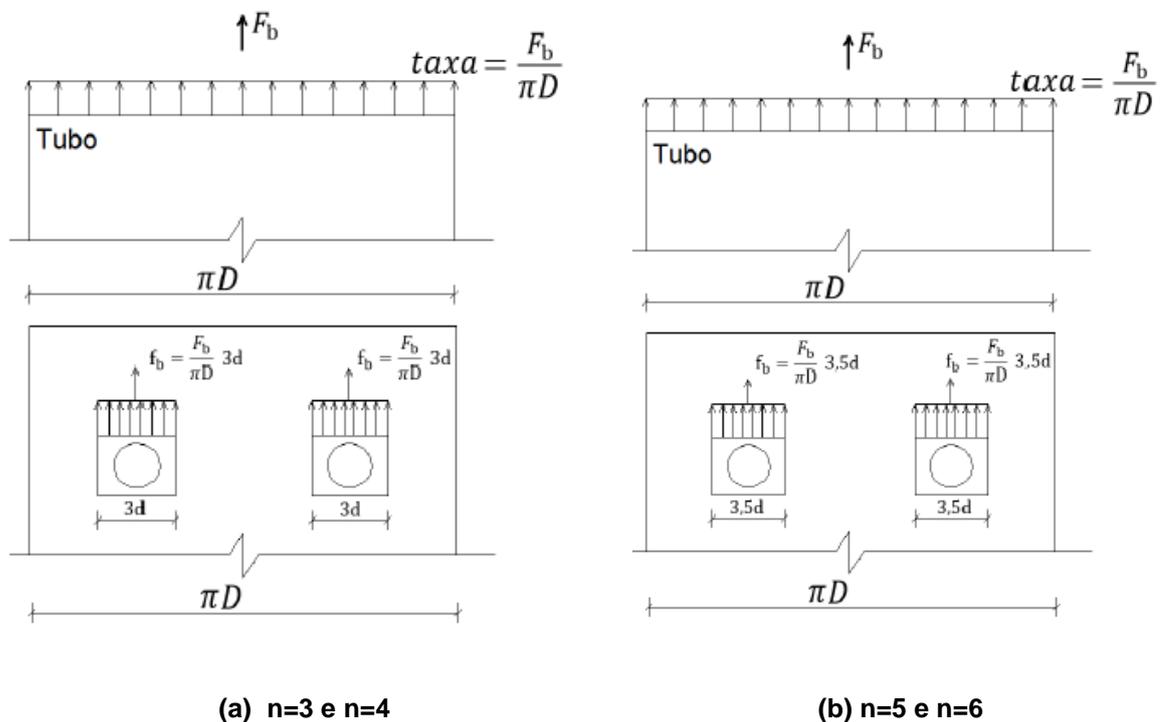


Figura 2.9: Esquema da influência da força axial na região do furo a partir de uma planificação dos tubos. n =número de parafusos (AMPARO, 2018).

Assim, as equações (2.12) e (2.13) definem a força no parafuso (F_b) para a situação da Figura 2.9 (a) e (b), respectivamente.

$$F_b = \frac{f_b}{\pi D} 3d \quad (2.12)$$

$$F_b = \frac{f_b}{\pi D} 3,5d \quad (2.13)$$

A partir da analogia feita do comportamento do parafuso à uma viga bi-apoiada, resulta-se na equação (2.14), levando em consideração o parafuso sob flexão.

$$F_b = \frac{f_{y,b} W_b}{x} \quad (2.14)$$

Onde:

$f_{y,b}$ é a resistência ao escoamento do parafuso;

W_b é o módulo de resistência elástico da seção do parafuso;

x é o braço de alavanca obtido pela equação (2.15).

$$x = \frac{(D_{ext} - t_{ext}) - (D_{int} - t_{int})}{2} \quad (2.15)$$

Portanto, igualando as equações (2.12) com (2.14) e (2.13) com (2.14), tem-se a equação final para a força total de tração (F_b) para ligações com 3 e 4 parafusos (2.16) e para ligações com 5 e 6 parafusos (2.17).

$$F_{b,Rd} = \frac{n f_{y,b} W_b \pi D_{int}}{3dx} / \gamma_{a1} \quad (2.16)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{n f_{y,b} W_b \pi D_{int}}{3,5dx} / \gamma_{a1} \quad (2.17)$$

Onde: D_{int} é o diâmetro do tubo interno e d é o diâmetro do furo.

2.7 Modos de falha

A análise da capacidade de resistência da ligação por luva depende da determinação da resistência para os cinco modos de falha possíveis:

- Modo 1: Escoamento da seção bruta (ESB);
- Modo 2: Ruptura da seção líquida (RSL);
- Modo 3: Cisalhamento do parafuso (CP);
- Modo 4: Ovalização do furo (OF); e
- Modo 5: Flexão dos parafusos (FP).

Segundo AMPARO,2018, para o seu dimensionamento, é necessário realizar a seguinte verificação, conforme a equação (2.18):

$$F_{sd} \leq F_{Rd} \quad (2.18)$$

Onde F_{sd} é a força solicitante de cálculo; e

F_{Rd} é a força resistente de cálculo dada pela expressão (2.19)

$$F_{Rd} = \min(N_{t,Rd1}; N_{t,Rd2}; F_{vRd}; F_{cRd}; F_{bRd}) \quad (2.19)$$

onde:

$N_{t,Rd1}$ é a força axial de tração resistente de cálculo (Modo 1 - ESB);

$N_{t,Rd2}$ é a força axial de tração resistente de cálculo (Modo 2 - RSL);

$F_{v,Rd}$ é a força de cisalhamento resistente de cálculo, por plano de corte (Modo 3 - CP);

$F_{c,Rd}$ é a força total resistente de cálculo à pressão de contato na parede dos furos, referente a ovalização dos furos (Modo 4 - OF);

$F_{b,Rd}$ é a força resistente de cálculo à flexão dos parafusos (Modo 5 – FP).

A Tabela 1 apresenta um resumo de todas as fórmulas necessárias para o dimensionamento da ligação tipo luva.

Tabela 1: Formulação para verificação da ligação luva (NETO, 2022).

| $F_{Rd} = \min(N_{t,Rd1}; N_{t,Rd2}; F_{v,Rd}; F_{c,Rd}; F_{b,Rd})$ | |
|---|---|
| $\lambda_{rel} \geq 1,6$ | $\lambda_{rel} = \frac{\lambda_{TE}}{\lambda_{TI}}; \lambda_{TE} = \frac{D_{ext}}{e_{ext}}; \lambda_{TI} = \frac{D_{int}}{e_{int}}$ |
| <p style="text-align: right; margin-right: 50px;">n° de parafusos</p> | <p>Modo 1 - ESB</p> $N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$ |
| | <p>Modo 2 - RSL</p> $\frac{l_c}{D_{ext}} \leq 3,00 \text{ e } \frac{d_b}{\lambda_{rel}} \leq 12,0$ |
| | $N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \begin{cases} A_e = C_t A_n \\ A_n = A_g - 2dt \\ C_t = 1 - \frac{e_c}{l_c}; e_c = \frac{D}{2} \end{cases}$ <p>para $n < 4$: $l_c = l_{f1} + (n - 1)l_{f2}$</p> <p>para $n \geq 4$: $l_c = l_{f1} + 3l_{f2}$</p> |
| | <p>Modo 3 - CP</p> $F_{v,Rd} = 2n \frac{\alpha A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}}$ <p>quando plano de corte na rosca: $\alpha = 0,4$</p> <p>quando plano de corte fora da rosca: $\alpha = 0,5$</p> |
| | <p>Modo 4 - OF</p> $F_{c,Rd} = 2n \frac{d_b t f_u}{\gamma_{a2}}$ |
| | <p>Modo 5 - FP</p> $5,75 \leq \frac{D_{ext}}{d_b} \leq 7,68$ |
| | <p>Para $n = 3$ ou 4: $F_{b,Rd} = \frac{n f_{y,b} W_b \pi D_{int}}{3dx} / \gamma_{a1}$</p> <p>Para $n = 5$ ou 6: $F_{b,Rd} = \frac{n f_{y,b} W_b \pi D_{int}}{3,5dx} / \gamma_{a1}$</p> $x = \frac{(D_{ext} - t_{ext}) - (D_{int} - t_{int})}{2}$ |
| <p>λ_{rel} - Esbeltez relativa dos tubos; λ_{TE} - Esbeltez do tubo externo; λ_{TI} - Esbeltez do tubo interno; D_{ext} - Diâmetro do tubo externo; t_{ext} - Espessura do tubo externo; D_{int} - Diâmetro do tubo interno; t_{int} - Espessura do tubo interno; d_b - Diâmetro do parafuso; d - Diâmetro do furo ($db + \text{folga}$); n - Número de parafusos; l_c - Comprimento efetivo da ligação; l_{f1} - Distância de furo a borda; l_{f2} - Distância de furo a furo; A_g - área bruta da seção do tubo; A_e - área líquida efetiva da seção do tubo;</p> | <p>A_n - área líquida da seção do tubo; A_b - área da seção do parafuso $A_b = 0,25\pi db^2$ C_t - Coeficiente de redução da área líquida; e_c - Excentricidade da ligação; D - Diâmetro do tubo externo, se obedecido $\lambda_{rel} \geq 1,6$; f_y - Resistência ao escoamento do aço do tubo; f_u - Resistência à ruptura do aço do tubo; $f_{y,b}$ - Resistência ao escoamento do parafuso; $f_{u,b}$ - Resistência à ruptura do parafuso; W_b - Módulo de resistência elástico da seção do parafuso; γ_{a1} e γ_{a2} - Coeficientes de ponderação da resistência; $N_{t,Rd1}$ - Força axial de tração resistente de cálculo (Modo 1); $N_{t,Rd2}$ - Força axial de tração resistente de cálculo (Modo 2); $F_{v,Rd}$ - Força de cisalhamento resistente de cálculo, por plano de corte (Modo 3); $F_{c,Rd}$ - Força total resistente de cálculo à pressão de contato na parede dos furos, referente a ovalização dos furos (Modo 4); $F_{b,Rd}$ - Força resistente de cálculo à flexão dos parafusos (Modo 5).</p> |

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho foi dividido em duas principais etapas: desenho e modelagem da estrutura, onde foram definidos os detalhes geométricos e estruturais do projeto; e dimensionamento, em que foram calculadas as cargas, forças e tensões, assegurando que a estrutura atenderá aos requisitos de segurança e desempenho.

3.1 A estrutura

A estrutura do projeto foi desenhada no *software* Tekla Structures, pertencente a Trimble, empresa americana de tecnologia de software, hardware e serviços. O Tekla é utilizado principalmente no detalhamento de aço e concreto e faz parte da indústria dos projetos de modelagem BIM (*Building Information Modeling*-Modelagem da Informação da Construção, em português), facilitando a criação e gerenciamento de modelos estruturais 3D.

O projeto consiste de um mezanino, a ser construído no interior de um galpão, destinado ao armazenamento de estoque de uma loja de tintas, com uma capacidade de carga de aproximadamente 400kg/m^2 . Os mezaninos em estrutura metálica são amplamente utilizados em edifícios comerciais. Dentre os benefícios desse tipo de estrutura pode-se destacar a maior facilidade de montagem, alta resistência, maximização da área útil de estocagem, juntamente com a capacidade de adaptação em qualquer ambiente. A seguir, tem-se a representação da estrutura em uma visualização 3D na Figura 3.1.

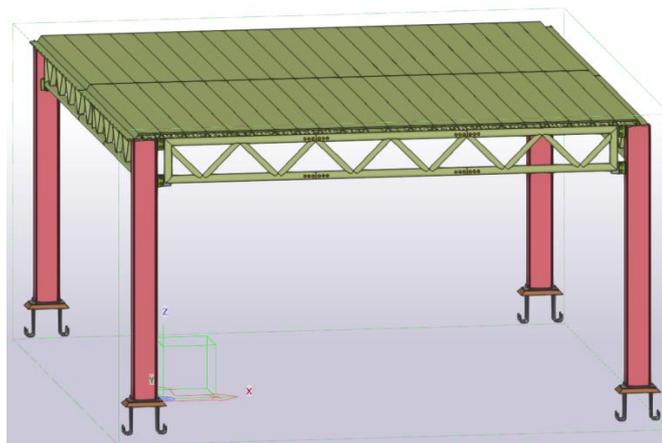


Figura 3.1: Representação da estrutura em 3D

O mezanino é composto por cinco vigas treliçadas, formadas por perfis tubulares, na qual será parte de estudo principal. O uso dos perfis tubulares é uma solução inovadora e traz muitas vantagens dentre elas: fator estético favorável, economia de material em comparação a outros perfis, além de possuírem propriedades mecânicas que resultam em estruturas leves, principalmente devido às suas elevadas resistências à compressão, torção e esforços combinados.

Nos próximos segmentos, serão abordados os aspectos gerais relacionados às colunas, vigas e parafusos utilizados na estrutura do mezanino. Serão discutidas as especificações dos materiais, os métodos de emenda e ligação, bem como as técnicas empregadas para assegurar a integridade estrutural e a segurança da edificação, detalhando as escolhas feitas durante o processo de projeto.

3.2 Detalhamento

Para os pilares, foi utilizado o perfil W310x32.7, com altura de 3,5 metros, que é tipicamente empregado em vigas e colunas de estruturas tradicionais. Esse perfil foi escolhido porque a edificação foi projetada para suportar cargas moderadas e contará com um vão de tamanho médio. Como o objetivo deste estudo não é avaliar a resistência global da estrutura, mas sim focar no desempenho das ligações no sistema treliçado, o dimensionamento dos pilares não foi contemplado na análise.

As vigas treliçadas possuem três tipos, de dimensões e disposições diferentes e podem ser visualizadas na Figura 3.2 em suas respectivas posições.

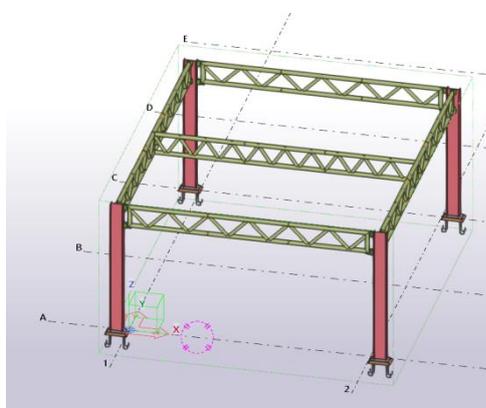
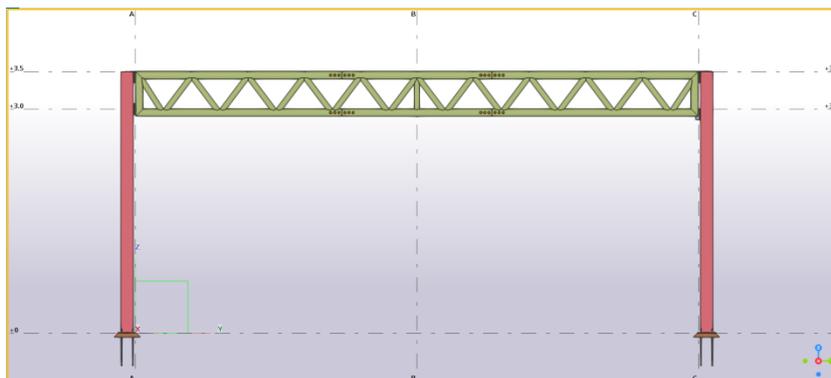
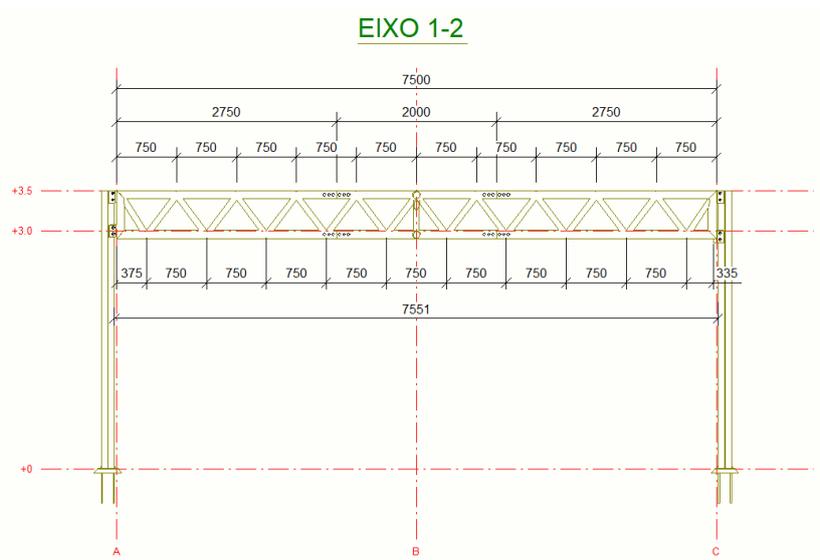


Figura 3.2: Demonstração das treliças.

O primeiro tipo de treliça está caracterizado na Figura 3.3, em que (a) apresenta a modelagem 3D e (b) a disposição dos tubos com as dimensões dadas em milímetros. Este modelo possui 7,5 metros de comprimento, com diagonais espaçadas a cada 0,75 metro, sendo fixado diretamente à alma do perfil. Para essa treliça são utilizadas duas seções com tubos de 2,75 metros e uma de 2 metros.



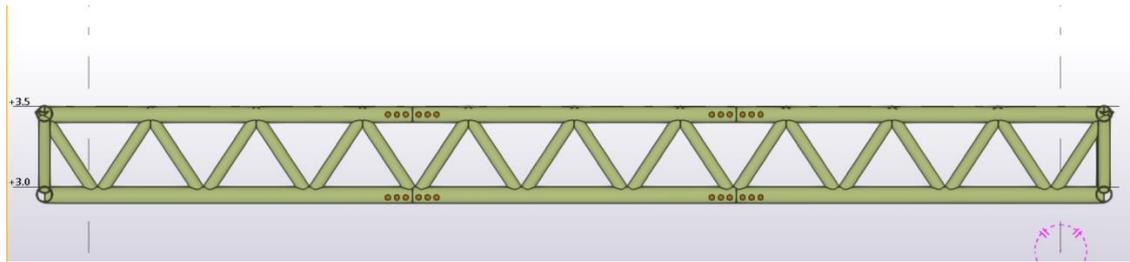
(a) Modelagem 3D



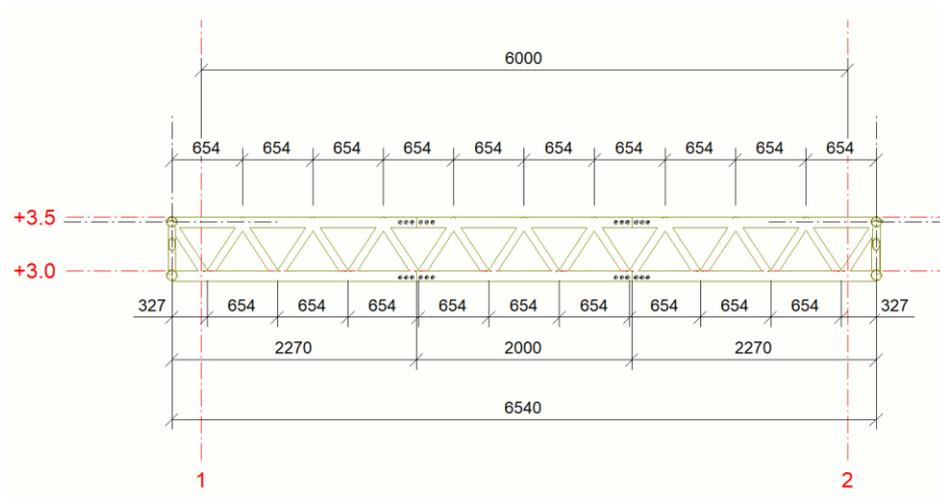
(b) Dimensões dadas em milímetros

Figura 3.3: Caracterização do modelo 1 do sistema treliçado.

O segundo modelo de treliça está ilustrado na Figura 3.4 e é a treliça central que divide a laje em dois vãos. Possui 6,54 metros de comprimento e diagonais espaçadas 0,654 metro entre si. Esse modelo possui duas seções de perfis de 2,27 metros e uma seção de dois metros.



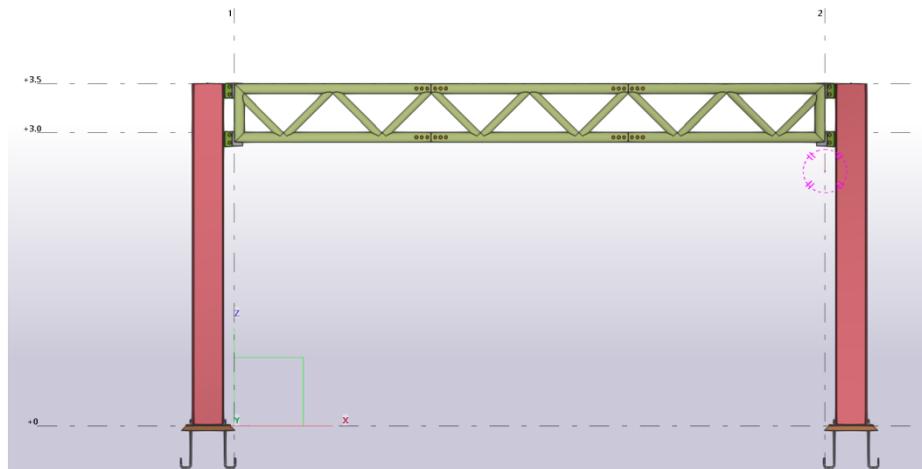
(a) Modelagem 3D



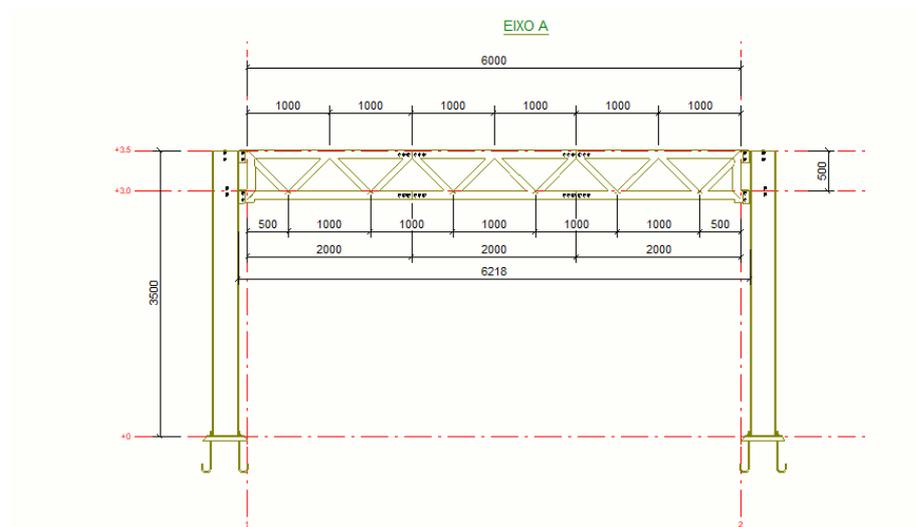
(b) Dimensões dadas em milímetros

Figura 3.4: Caracterização do modelo 2 do sistema treliçado.

Por fim, o último modelo de treliça é exibido na Figura 3.5, está fixada na mesa do perfil, possui comprimento total de 6 metros, sendo padronizada a distância de 1 metro entre as diagonais. Esse modelo possui três seções de perfis de 2 metros.



(a) Modelagem 3D



(b) Dimensões dadas em milímetros

Figura 3.5: Caracterização do modelo 3 do sistema treliçado.

Os tubos utilizados nas treliças foram selecionados a partir do catálogo da fabricante Vallourec S.A. Para os banzos, optou-se por perfis HSS (do inglês *Hollow Structural Sections*, que em português significa Perfis Estruturais Vazados) de 101,6 x 6,4 mm, enquanto as diagonais empregam perfis HSS de 73 x 8 mm. Todos os tubos são fabricados em aço A501, conforme especificação da ASTM 501, que define requisitos para tubos de aço carbono soldados e sem costura, formados a quente, adequados para aplicações estruturais.

A ilustração da ligação tipo luva usada neste estudo é exibida na Figura 3.6. Nessa ligação, o tubo externo corresponde aos banzos, enquanto o tubo interno, onde será realizada a conexão, também é um perfil HSS de 73,0 x 8,0 mm. Os parafusos possuem diâmetro 19,05mm ou 3/4 polegadas, no padrão A325. O diâmetro do furo e os espaçamentos entre furo e furo e furo e borda foram estabelecidos de acordo com os limites prescritos pela ABNT NBR 8800 (2024) e são apresentados na Figura 3.7.

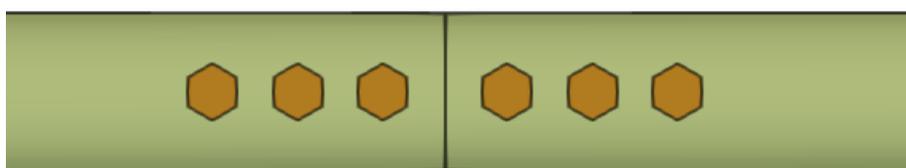


Figura 3.6: Ilustração da ligação luva

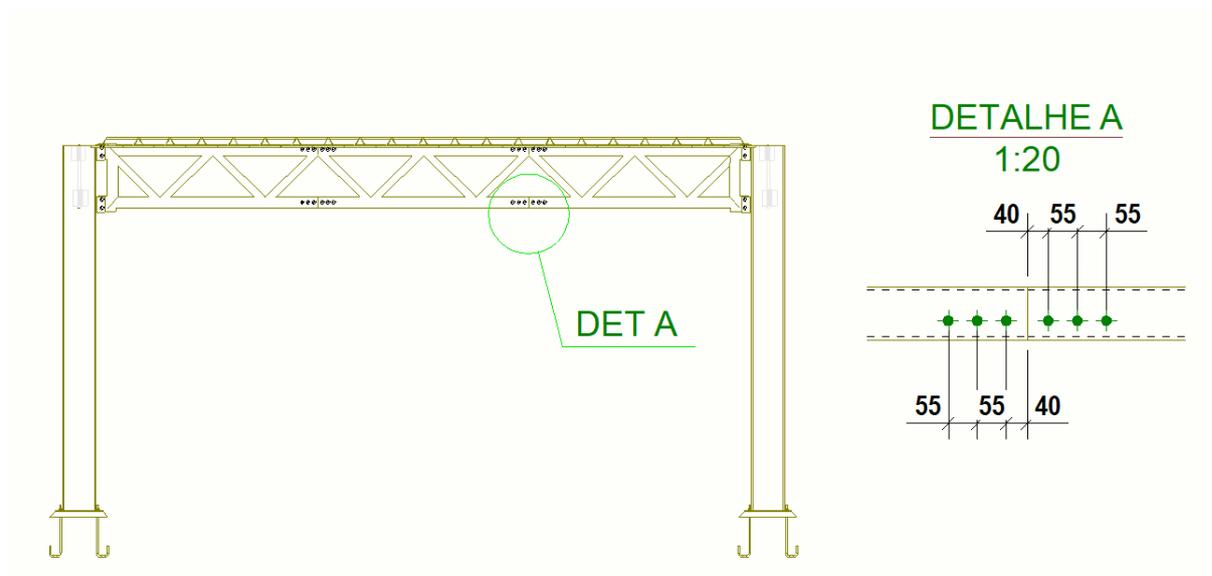


Figura 3.7: Detalhe ligação luva.

Os parâmetros da luva foram utilizados com base nos estudos de (NETO, 2022) e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros luva

| Descrição | Simbologia | Valor | Unidade |
|---|-------------------|--------------|-----------------|
| Comprimento da luva | L_c | 500 | mm |
| Diâmetro do tubo interno | D_{int} | 73 | mm |
| Espessura do tubo interno | t_{int} | 8 | mm |
| Diâmetro do parafuso | d_b | 19,05 | mm |
| Resistência ao escoamento do parafuso | $f_{y,b}$ | 635 | MPa |
| Resistência à ruptura do parafuso | $f_{u,b}$ | 825 | MPa |
| Momento de inércia do parafuso | I_b | 6464,72 | mm ⁴ |
| Módulo de resistência elástico da seção do parafuso | W_b | 678,71 | mm ³ |
| Número de parafusos | n | 6 | - |
| Parâmetro que define o plano de corte (na rosca 0,4, fora 0,5) | α | 0,4 | - |

3.3 Dimensionamento

Nesse trabalho, o dimensionamento inclui a determinação dos esforços solicitantes dos sistemas treliçados, verificações das barras e sua capacidade resistente e dimensionamento da luva. Para ligação luva, não prevista em normas, o dimensionamento foi feito baseando-se nos estudos apresentados por AMPARO, 2018. As escolhas dos materiais e dimensões foram baseadas no trabalho realizado por NETO, 2022.

3.3.1 Laje

Para determinar o carregamento que as treliças deverão suportar, é fundamental compreender as especificações e escolhas feitas para a laje. No projeto em questão, optou-se pela utilização de lajes tipo Steel Deck, que são formadas pela combinação de um perfil de aço galvanizado com concreto armado. Dentre as diversas vantagens para a construção, pode-se destacar: a alta qualidade de acabamento da laje, a dispensa de escoramento, a redução dos gastos com desperdício de material, a facilidade de instalação e a maior rapidez construtiva.

A Tabela 3 apresenta os valores utilizados para a definição do peso próprio da laje, com dados obtidos da empresa Metform, pioneira no uso de Steel Deck no Brasil.

Tabela 3: Tabela de cargas e vão máximos MF-75

| | Altura total da laje (mm) | Espessura Steel Deck (mm) | Vãos Máximos sem Escoramento | | | | Peso Próprio (kN/m ²) | M. Inércia Laje Mista (10 mm ⁴ /m) |
|--|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|--------------|--------------|-----------------------------------|---|
| | | | Simples (mm) | Duplos (mm) | Triplos (mm) | Balanço (mm) | | |
| Lajes de piso | 150 | 1,25 | 3.400 | 4.000 | 4.100 | 1.550 | 2,79 | 19,05 |
| Vãos Máximos Sem Escoramento | | | | | | | | |
| | 2.000 | 2.100 | 2.200 | 2.300 | 2.400 | 2.500 | 2.600 | 2.700 |
| Carga sobreposta máxima (kN/m ²) | | | | | | | | |
| Lajes de piso | 20,00 | 20,00 | 18,65 | 16,91 | 15,38 | 14,02 | 12,82 | 11,75 |
| Vãos Máximos Sem Escoramento | | | | | | | | |
| | 2.800 | 2.900 | 3.000 | 3.150 | 3.300 | 3.500 | 3.750 | 4.000 |
| Carga sobreposta máxima (kN/m ²) | | | | | | | | |
| Lajes de piso | 10,78 | 9,91 | 9,13 | 8,09 | 7,18 | 6,15 | 5,07 | 4,19 |

Fonte: (METFORM)

A tabela apresenta valores referentes ao uso da forma com altura de 75 mm (MF-75), cujas dimensões estão ilustradas na Figura 3.8. A outra opção disponibilizada pela empresa seria uma forma de 50 mm de altura (MF-50), que, apesar de proporcionar uma maior economia de material para a obra, não pode ser considerada neste estudo, pois não permite trabalhar com vãos máximos sem escoramentos maiores que 3,2 metros.

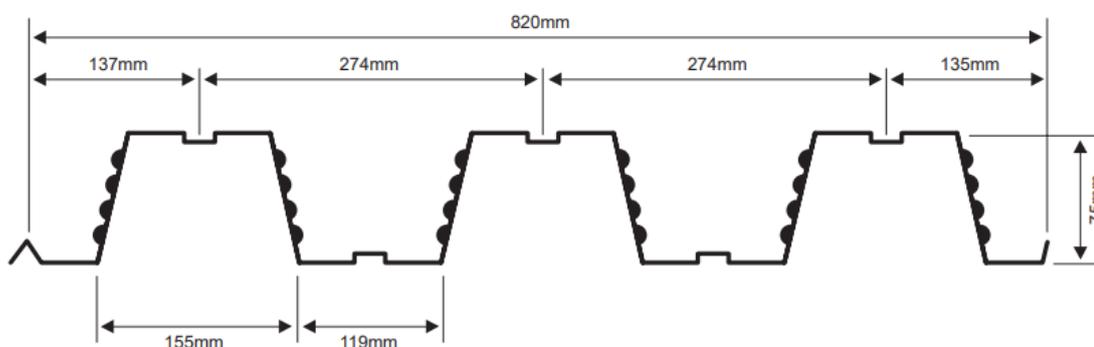


Figura 3.8 Dimensões forma MF-75 (METFORM).

Por se tratar de uma estrutura de vão duplo, pode-se utilizar uma laje de piso com altura total de 150 mm de altura e de espessura telha-forma de 1,25 mm, capaz de suportar uma carga em um vão de até 4.000 mm. Para esses valores, o peso próprio da laje é de 2,79 kN/m². A laje, conforme mencionado anteriormente, será utilizada para um estoque de tintas de aproximadamente 400 kg/m², portanto, a sobrecarga referente a esse estoque será de 4,0 kN/m². De acordo com a tabela, o valor atende aos requisitos de carga, pois a laje adotada, com 3.865 mm, pode suportar uma carga sobreposta de até aproximadamente 4,66 kN/m² sem necessidade de escoramento. Esse valor foi obtido por interpolação entre os valores da tabela para 3.750 mm e 4.000 mm.

3.3.2 Combinações de ações

De acordo com a (ABNT NBR 8800, 2024), as combinações últimas normais decorrem do uso previsto para a edificação e são determinadas a partir da expressão (3.1):

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (3.1)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$ representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

Os valores dos coeficientes de ponderação γ_g e γ_q foram obtidos pela tabela da ABNT NBR 8800, 2024, conforme ilustrado na Figura 3.9.

| Combinações | Ações permanentes (γ_2) ^{a,c} | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|--|--|-------------|
| | Diretas | | | | | Indiretas |
| | Peso próprio de estruturas metálicas | Peso próprio de estruturas pré-moldadas | Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes | Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i> | Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos | |
| Normais | 1,25 (1,00) | 1,30 (1,00) | 1,35 (1,00) | 1,40 (1,00) | 1,50 (1,00) | 1,20 (0) |
| Especiais ou de construção | 1,15 (1,00) | 1,20 (1,00) | 1,25 (1,00) | 1,30 (1,00) | 1,40 (1,00) | 1,20 (0) |
| Excepcionais | 1,10 (1,00) | 1,15 (1,00) | 1,15 (1,00) | 1,20 (1,00) | 1,30 (1,00) | 0 (0) |
| | Ações variáveis (γ_d) ^{a,d} | | | | | |
| | Efeito da temperatura ^b | Ação do vento | Ações truncadas ^e | Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação | | |
| Normais | 1,20 | 1,40 | 1,20 | 1,50 | | |
| Especiais ou de construção | 1,00 | 1,20 | 1,10 | 1,30 | | |
| Excepcionais | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | | |

^a Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

^b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

^c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

^d Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

^e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

Figura 3.9: Valores dos coeficientes de ponderação das ações (ABNT NBR 8800, 2024).

Nesse estudo, para as ações permanentes foi empregado o valor de 1,40, e para as ações variáveis, o valor de 1,50. Para o peso próprio da treliça (Pt) foi utilizado o valor de 1,25. Para determinar o carregamento que será suportado por cada treliça, foram considerados como carga permanente, o peso próprio da laje (Ppl) e como carga variável a sobrecarga (Sc).

- Ppl = 2,79 kN/m² (valor estabelecido no tópico anterior)
- Sc = 4 kN/m² (valor estabelecido no tópico anterior)

O peso da estrutura treliçada (Pt) foi estabelecido através do catálogo de aços estruturais da empresa Vallourec S.A, destacado na Figura 3.10. O catálogo indica o peso em kg por metro linear de tubos circulares sem costura a partir de suas dimensões. Como nessa pesquisa foi proposta a utilização do tubo de diâmetro 101,6 mm e espessura 6,4 mm para os banzos, o valor correspondente ao seu peso é de 15,0 kg/m, o que corresponde a 0,150 kN/m. Para as diagonais, foi especificado o uso de tubos com diâmetro de 73 mm e espessura de 8 mm, com peso de 12,8 kg/m, o que equivale a 0,128 kN/m.



TUBOS ESTRUTURAIS SEM COSTURA - DIMENSÕES FREQUENTES

| DIÂMETRO EXTERNO (mm) | TUBOS CIRCULARES SEM COSTURA - PESO (kg/m)  | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | ESPESSURA (mm) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3,2 | 3,6 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,6 | 6,4 | 7,1 | 8,0 | 8,8 | 10,0 | 11,0 | 12,5 | 14,2 | 16,0 | 17,5 | 20,0 |
| 33,4 | 2,38 | 2,65 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38,1 | 2,75 | 3,06 | 3,36 | | | | | | | | | | | | | | |
| 42,2 | | 3,43 | 3,77 | 4,18 | 4,59 | | | | | | | | | | | | |
| 48,3 | | 3,97 | 4,37 | 4,86 | 5,34 | 5,90 | 6,61 | | | | | | | | | | |
| 60,3 | | 5,03 | 5,55 | 6,19 | 6,82 | 7,55 | 8,51 | 9,32 | 10,3 | 11,2 | | | | | | | |
| 73,0 | | 6,16 | 6,81 | 7,60 | 8,38 | 9,31 | 10,5 | 11,5 | 12,8 | 13,9 | 15,5 | 16,8 | | | | | |
| 88,9 | | 7,57 | 8,38 | 9,37 | 10,3 | 11,5 | 13,0 | 14,3 | 16,0 | 17,4 | 19,5 | 21,1 | 23,6 | | | | |
| 101,6 | | | 9,63 | 10,8 | 11,9 | 13,3 | 15,0 | 16,5 | 18,5 | 20,1 | 22,6 | 24,6 | 27,5 | | | | |
| 114,3 | | | 10,9 | 12,2 | 13,5 | 15,0 | 17,0 | 18,8 | 21,0 | 22,9 | 25,7 | 28,0 | 31,4 | 35,1 | | | |
| 141,3 | | | | | 16,8 | 18,7 | 21,3 | 23,5 | 26,3 | 28,8 | 32,4 | 35,3 | 39,7 | 44,5 | 49,4 | 53,4 | |
| 168,3 | | | | | 20,1 | 22,5 | 25,6 | 28,2 | 31,6 | 34,6 | 39,0 | 42,7 | 48,0 | 54,0 | 60,1 | 65,1 | 73,1 |
| 219,1 | | | | | | | 33,6 | 37,1 | 41,6 | 45,6 | 51,6 | 56,5 | 63,7 | 71,8 | 80,1 | 87,0 | 98,2 |
| 273,0 | | | | | | | 42,1 | 46,6 | 52,3 | 57,3 | 64,9 | 71,1 | 80,3 | 90,6 | 101 | 110 | 125 |
| 323,8 | | | | | | | 50,1 | 55,5 | 62,3 | 68,4 | 77,4 | 84,9 | 96,0 | 108 | 121 | 132 | 150 |
| 355,6 | | | | | | | | | 68,6 | 75,3 | 85,2 | 93,5 | 106 | 120 | 134 | 146 | 166 |

Figura 3.10: Catálogo de pesos pra tubos circulares sem costura (VALLOUREC S.A, 2023).

Na Figura 3.11 é ilustrado o desenho da estrutura em planta, com a nomenclatura adotada para cada treliça, que será fundamental para entendimento dos cálculos dos carregamentos correspondentes que serão apresentados a seguir. As treliças T01 e T03 recebem uma mesma intensidade de carga, assim como as treliças T04 e T05. A treliça T02 apresenta um comportamento diferente das demais, devido ao seu posicionamento. Além disso, cada treliça apresenta diferentes quantidades e disposições de tubos, o que impacta diretamente em seu peso próprio, que são:

- Pt_1 (T01/T03) = 0,50 kN/m
- Pt_2 (T02) = 0,54 kN/m
- Pt_3 (T04/T05) = 0,53 kN/m

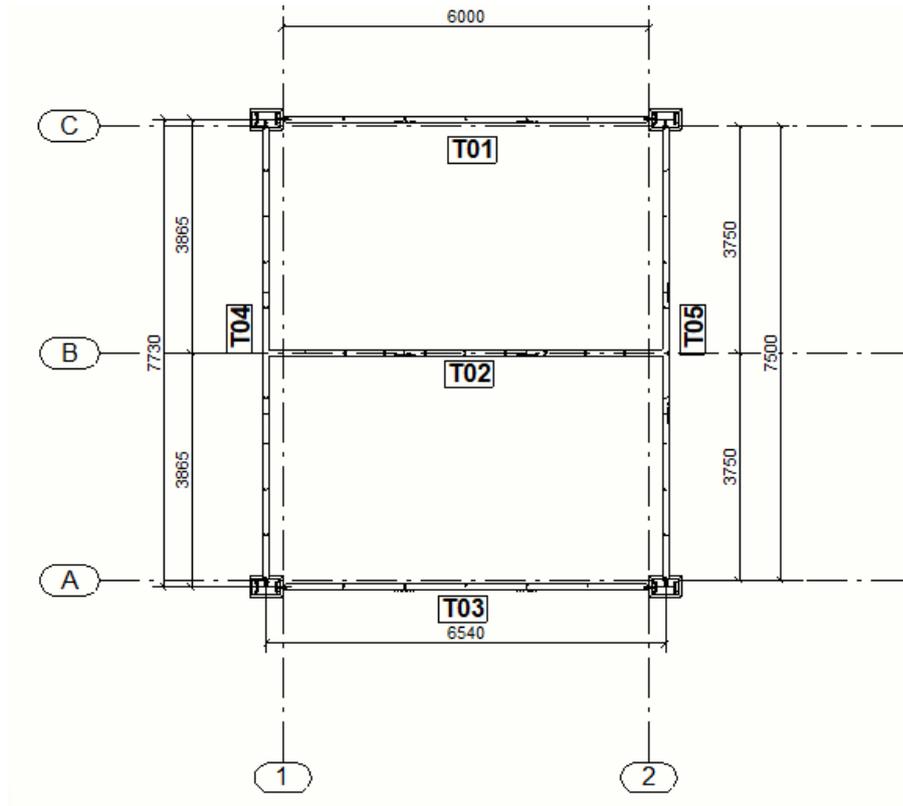


Figura 3.11: Estrutura em planta com nomeação para cada treliça.

3.3.2.1 Carregamento em T02

A Figura 3.12 ilustra a área de influência recebida pela T02 devido ao carregamento da laje. Para determinar a carga por metro linear atuante na T02, é necessário multiplicar o peso por área pela largura da área de influência.

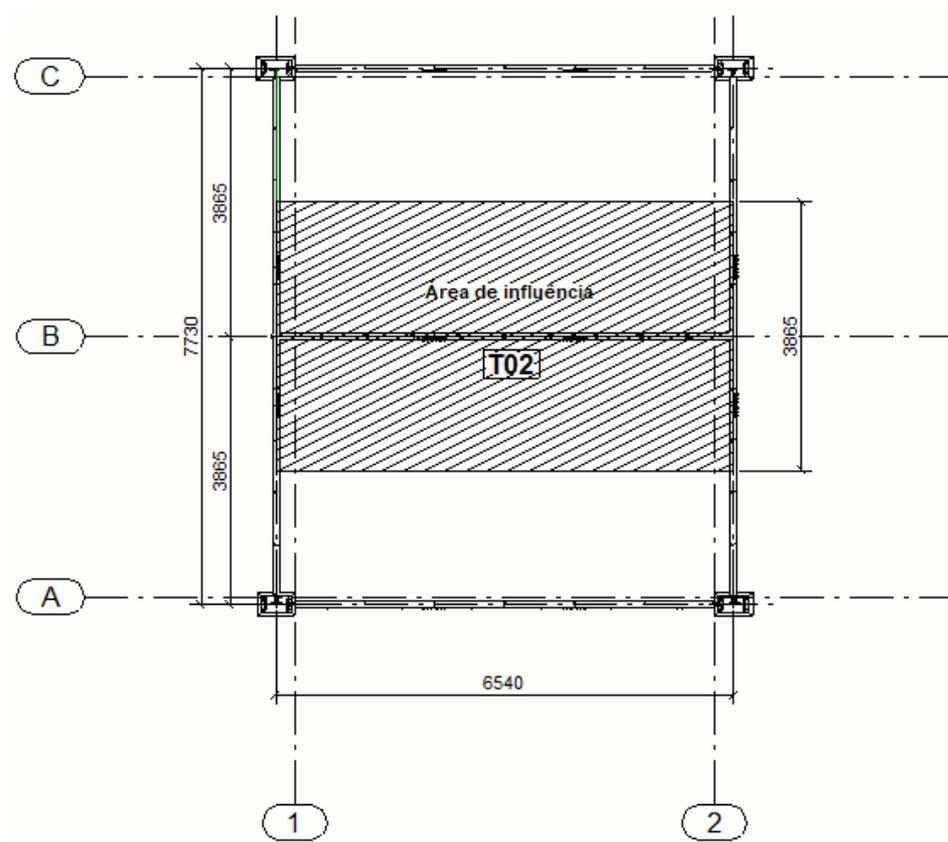


Figura 3.12: Representação da área de influência sob a T02.

Assim, as cargas por metro linear que atuam na T02 provenientes do peso próprio da laje, do peso da estrutura e da sobrecarga são expressas, respectivamente, por:

$$2,79 \times 3,865 = 10,78 \text{ kN/m} - P_{pl}$$

$$0,54 \text{ kN/m} - P_t$$

$$4 \times 3,865 = 15,46 \text{ kN/m} - S_c$$

Aplicando-se a combinação de ações tem-se, a partir da equação (3.1):

$$F_{d_{T02}} = 1,40(10,78) + 1,5(15,46) + 1,25(0,54)$$

$$F_{d_{T02}} = 38,96 \text{ kN/m}$$

De maneira análoga ao procedimento realizado para a treliça T02, os mesmos cálculos serão aplicados às treliças T01 e T03.

3.3.2.2 Carregamento em T01 e T03

A Figura 3.13 ilustra a área de influência recebida pela T02 devido ao carregamento da laje.

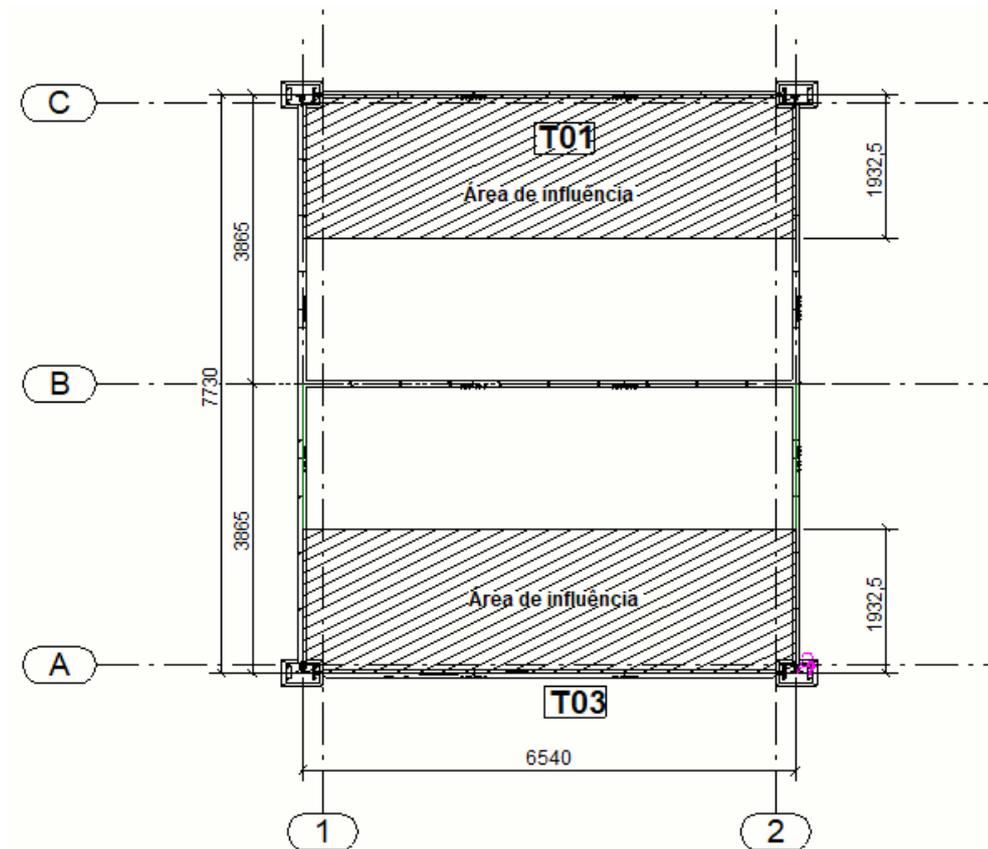


Figura 3.13: Representação da área de influência sob T01 e T03.

As cargas por metro linear são dadas por:

$$2,79 \times 1,9325 = 5,39 \text{ kN/m} - Ppl$$

$$0,50 \text{ kN/m} - Pt$$

$$4 \times 1,9325 = 7,73 \text{ kN/m} - Sc$$

Assim,

$$Fd_{T01/T03} = 1,40(5,39) + 1,5(7,73) + 1,25(0,50)$$

$$Fd_{T01/T03} = 19,77 \text{ kN/m}$$

3.3.2.3 Carregamento em T04 e T05

A laje está apoiada nas treliças T04 e T05, de modo que o carregamento atuante sobre elas é gerado pelas reações dos esforços transmitidos pelas treliças T01, T02 e T03, além do peso próprio e da sobrecarga.

Assim,

$$0,53 \text{ kN/m} - Pt$$

$$4 \times 7,5 = 30 \text{ kN/m} - Sc$$

Assim,

$$Fd_{T04/T05} = 1,50(30) + 1,25(0,53)$$

$$Fd_{T04/T05} = 45,66 \text{ kN/m}$$

A Tabela 4 dispõe um resumo dos valores utilizados nos cálculos de carregamento.

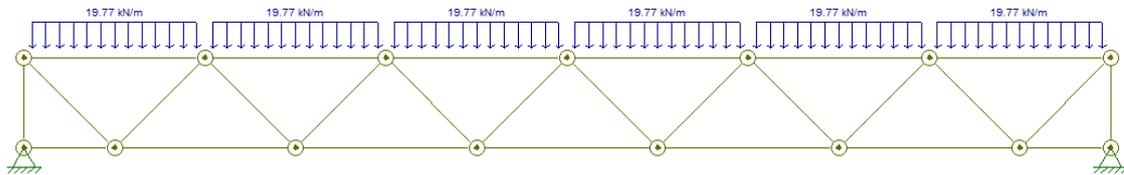
Tabela 4: Resumo parâmetros para cálculo do carregamento.

| | Unidade | T01/T03 | T02 | T04/T05 |
|-----------------------------|----------------|----------------|------------|----------------|
| Peso próprio treliça | kN/m | 0,50 | 0,54 | 0,53 |
| Peso próprio laje | kN/m | 5,39 | 10,78 | - |
| Sobrecarga | kN/m | 7,73 | 15,46 | 30 |
| Carregamento | kN/m | 19,77 | 38,96 | 45,66 |

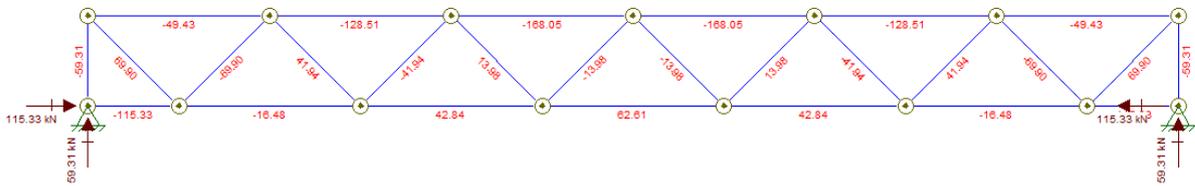
3.3.3 Esforços solicitantes

Para a determinação dos esforços solicitantes, a estrutura foi simulada no *software* Ftool. A partir dessa simulação, foram obtidos os valores dos esforços atuantes em cada treliça, com o objetivo de avaliar a capacidade da estrutura de suportar as cargas aplicadas. Esses valores serão posteriormente comparados aos esforços resistentes de cálculo, permitindo verificar se o dimensionamento da estrutura é adequado e atende aos critérios de segurança e eficiência.

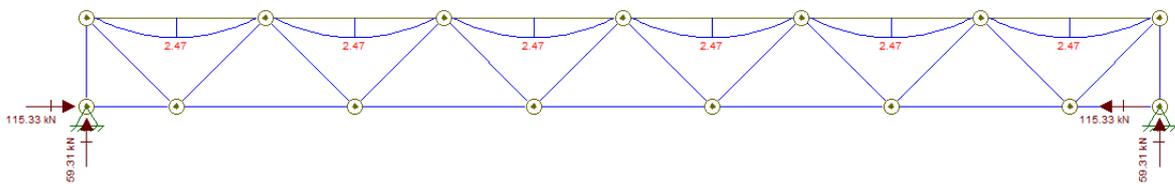
A Figura 3.14 ilustra o carregamento recebido por T01 e T03 (a), simulado no Ftool e os diagramas de força axial (b) e momento fletor (c) obtidos para esse sistema.



(a) Carregamento em T01 e T03.



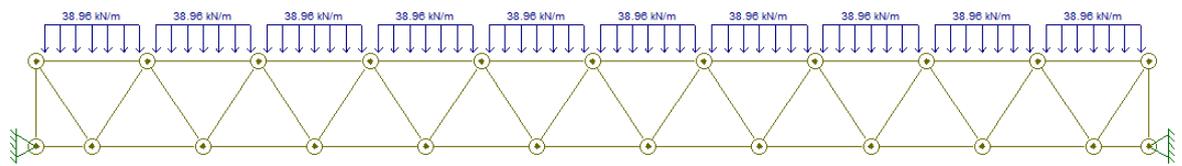
(b) Diagrama da força axial treliças T01 E T03. Unidade: kN



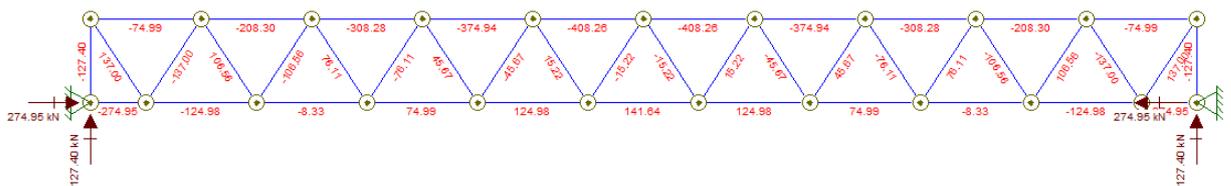
(c) Diagrama de momento fletor treliças T01 e T03. Unidade: kN.m

Figura 3.14: Diagramas obtidos para T01 e T03.

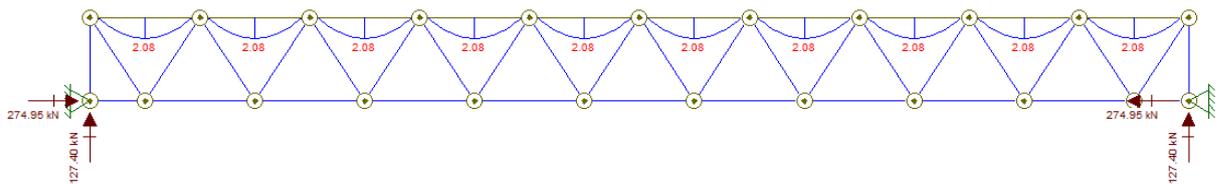
O mesmo procedimento foi realizado para as treliças T02, T04 e T05 e estão representados na Figura 3.15 e 3.16, respectivamente.



(a) Carregamento em T02.

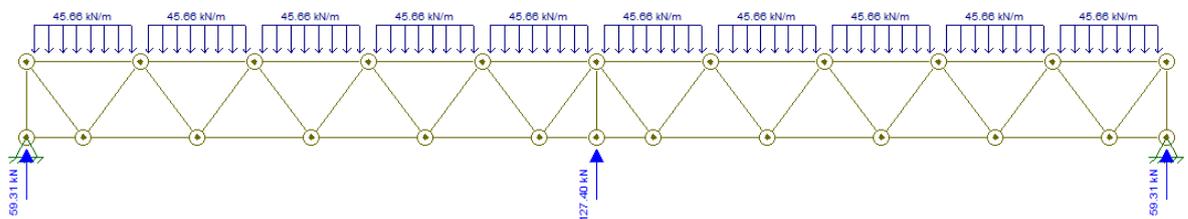


(b) Diagrama da força axial treliças T02. Unidade: kN

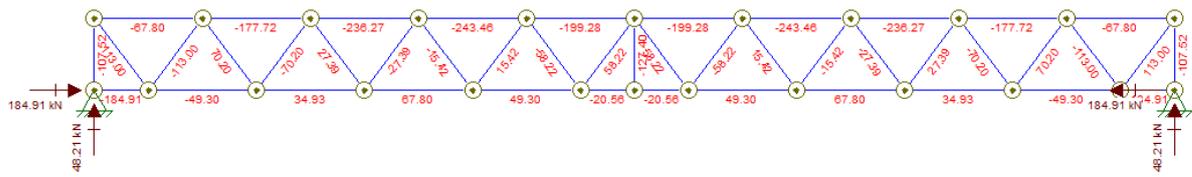


(c) Diagrama de momento fletor treliças T02. Unidade: kNm

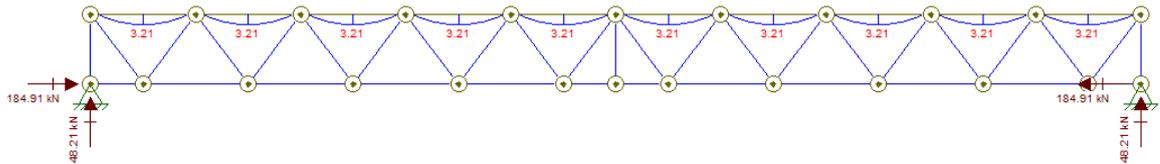
Figura 3.15: Diagramas obtidos para T02.



(a) Carregamento em T04 e T05.



(b) Diagrama da força axial treliças T04 E T05. Unidade: kN



(c) Diagrama de momento fletor treliças T04 e T05. Unidade:kNm

Figura 3.16: Diagramas obtidos para T04 e T05.

3.3.4 Verificação das barras

A verificação das barras foi conduzida com base nos seguintes parâmetros: força resistente à compressão, à tração e momento fletor resistente. Todos os cálculos realizados seguiram as diretrizes estabelecidas pela NBR 8800:2008, garantindo conformidade com as normas técnicas vigentes.

3.3.4.1 Força resistente à tração

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, é dada pelo menor dos valores obtidos, considerando-se os estados-limites últimos de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, de acordo com as expressões (2.1) e (2.2), apresentadas no capítulo anterior.

- Área bruta da seção transversal do tubo (A_g)

$$A_g = \pi r^2$$

Em que r é o raio do tubo.

Para banzos:

$$A_g = \pi \times 50,8^2 = 8107,32 \text{ mm}^2$$

Para diagonais:

$$A_g = \pi \times 36,5^2 = 4185,4 \text{ mm}^2$$

- Área líquida da seção do tubo (A_n)

$$A_n = \pi/4 [D^2 - (D - 2t)^2]$$

Em que,

D é o diâmetro do tubo;

t é a espessura do tubo.

Para banzos:

$$A_n = \pi/4 [101,6^2 - (101,6 - 2 \times 6.4)^2] = 1914,11 \text{ mm}^2$$

Para diagonais:

$$A_n = \pi/4 [73^2 - (73 - 2 \times 8)^2] = 1633,63 \text{ mm}^2$$

- Área líquida efetiva da seção do tubo (A_e)

A área líquida efetiva da seção do tubo é dada pela equação (2.6) apresentada no capítulo 2 e depende do coeficiente de redução da área líquida (C_t) e da área líquida da seção do tubo (A_n).

$$A_e = C_t A_n$$

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l_c}$$

Para banzos:

$$e_c = \frac{101,6}{2} = 50,8 \text{ mm}$$

$$l_c = l_{f1} + 3l_{f2} = 40 + (3) \times 55 = 205 \text{ mm}$$

Logo,

$$C_t = 1 - \frac{50,8}{205} = 0,75$$

A área líquida efetiva é dada então por:

$$A_e = 0,75 \times 1914,11 = 1435,58 \text{ mm}^2$$

Para escoamento da seção bruta tem-se:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{81,07 \times 30}{1,1} = 2211 \text{ kN}$$

Para a ruptura da seção líquida tem-se:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{14,36 \times 41,5}{1,35} = 441,4 \text{ kN}$$

Para diagonais:

A área líquida efetiva é dada então por:

$$A_e = A_n = 1633,63 \text{ mm}^2$$

Para escoamento da seção bruta tem-se:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{41,85 \times 30}{1,1} = 1141,4 \text{ kN}$$

Para a ruptura da seção líquida tem-se:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{16,34 \times 41,5}{1,35} = 502,3 \text{ kN}$$

Os coeficientes de ponderação são obtidos pela tabela representada pela Figura 3.17, presente no item 4.8.2.3 da (ABNT NBR 8800, 2024).

| Combinações | Aço estrutural ^a | | Concreto γ_c | Aço das armaduras γ_s |
|----------------------------|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|
| | γ_a | | | |
| | Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1} | Ruptura γ_{a2} | | |
| Normais | 1,10 | 1,35 | 1,40 | 1,15 |
| Especiais ou de construção | 1,10 | 1,35 | 1,20 | 1,15 |
| Excepcionais | 1,00 | 1,15 | 1,20 | 1,00 |

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Figura 3.17: Valores dos coeficientes de ponderação das resistências (ABNT NBR 8800, 2024).

Considera-se então, a força resistente de cálculo igual a 441,4 kN para os banzos e 502,3 kN para as diagonais.

3.3.4.2 Força resistente à compressão

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada pela expressão (3.2):

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (3.2)$$

Onde:

χ é fator de redução associado à compressão

Q é o fator de redução total associado à flambagem local

A_g é a área bruta da seção transversal da barra.

De acordo com a (ABNT NBR 16239, 2013), o fator axial de compressão resistente, χ , para perfis tubulares, laminados a quente (sem costura), pode ser dado pela equação (3.3):

$$\chi = \frac{1}{(1 + \lambda_0^{4,48})^{1/2,24}} \quad (3.3)$$

Onde λ_0 é o índice de esbeltez reduzido dado pela equação

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{Ne}} \quad (3.4)$$

Em que:

A_g é a área bruta da seção transversal da barra;

N_e é a força axial da flambagem elástica, obtida conforme a (ABNT NBR 8800, 2024) e dada pela equação (3.5);

Q é o fator de redução total associado à flambagem local, obtido conforme a (ABNT NBR 8800, 2024).

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3.5)$$

Onde:

KL é o comprimento de flambagem por flexão

I é o momento de inércia da seção transversal

O comprimento de flambagem por flexão (KL), é estabelecido, de acordo com a NBR 16239, 2013 em que, as treliças formadas apenas por perfis tubulares, mesmo a consideração de que os nós sejam rotulados, pode ser tomado igual a:

- a) $0,9L$, dos banzos, no plano e fora do plano, onde L é o comprimento da barra, medido entre os nós no plano e o comprimento entre duas contenções laterais fora do plano
- b) $0,9L$ para $\beta > 0,60$ ou $0,75$ para $\beta \leq 0,60$, se diagonais e montantes forem ligados aos banzos diretamente por meio de solda, em todo o seu perímetro, no plano e fora do plano.

Onde L é a distância entre nós e β é definido pela equação (3.6), para as ligações K e N.

$$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2d_0} \quad (3.6)$$

Em que d_1 , d_2 e d_0 são definidos pela Figura 3.18.

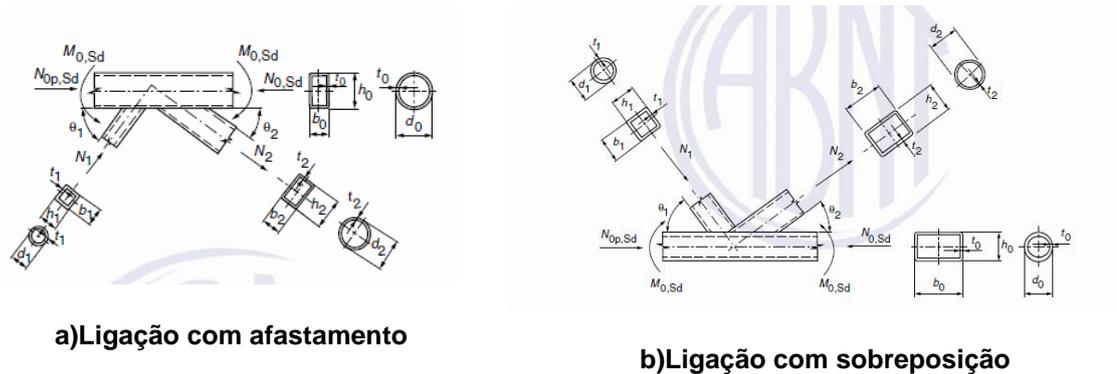


Figura 3.18: Parâmetros e convenções para definição de β (ABNT NBR 16239, 2013).

Portanto,

$$\beta = \frac{73 + 73}{2 \times 101,6} = 0,72$$

De acordo com o item F.4, anexo F da NBR 8800,2008, o fator de redução para flambagem local da parede é dado por:

$$Q = 1,00 \text{ para } \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y} \quad (3.7)$$

Onde:

D é o diâmetro externo da seção

t é a espessura da parede

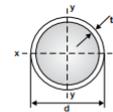
Comprovando a equação (3.7) tem-se:

$$\frac{101,6}{6,4} \leq 0,11 \frac{200000}{300} \rightarrow 15,88 \leq 73,33 \text{ para banzos}$$

$$\frac{73}{8} \leq 0,11 \frac{200000}{300} \rightarrow 9,125 \leq 73,33 \text{ para diagonais}$$

O momento de inércia necessário para calcular a força axial da flambagem elástica (N_e), foi retirado do catálogo de tubos estruturais da Vallourec S.A, representado na Figura 3.19.

Seção Tubular Circular (TC)



| Dimensões externas | Espessura da parede | Massa por Unidade de Comp. | Área da Seção Transversal | Momento de Inércia | Raio de Giração | Módulo de Resistência Elástico | Módulo de Resistência Plástico | Const. Torção | Módulo de Resistência à Torção | Área de superfície por unidade de Comp. |
|--------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---|
| d (mm) | t (mm) | m (kg/m) | A (cm²) | $I_x = I_y$ (cm⁴) | $r_x = r_y$ (cm) | $W_x = W_y$ (cm³) | $Z_x = Z_y$ (cm²) | J (cm⁴) | W_t (cm³) | U (m²/m) |
| 88,9 | 3,6 | 7,57 | 9,65 | 87,9 | 3,02 | 19,8 | 26,2 | 176 | 39,5 | 0,279 |
| | 4,0 | 8,38 | 10,7 | 96,3 | 3,00 | 21,7 | 28,9 | 193 | 43,3 | |
| | 4,5 | 9,37 | 11,9 | 107 | 2,99 | 24,0 | 32,1 | 213 | 47,9 | |
| | 5,0 | 10,3 | 13,2 | 116 | 2,97 | 26,2 | 35,2 | 233 | 52,4 | |
| | 5,6 | 11,5 | 14,7 | 128 | 2,95 | 28,7 | 38,9 | 255 | 57,5 | |
| | 6,4 | 13,0 | 16,6 | 142 | 2,93 | 31,9 | 43,6 | 284 | 63,9 | |
| | 7,1 | 14,3 | 18,2 | 154 | 2,90 | 34,6 | 47,6 | 308 | 69,2 | |
| | 8,0 | 16,0 | 20,3 | 168 | 2,87 | 37,8 | 52,5 | 336 | 75,6 | |
| | 8,8 | 17,4 | 22,1 | 180 | 2,85 | 40,4 | 56,7 | 359 | 80,9 | |
| | 10,0 | 19,5 | 24,8 | 196 | 2,81 | 44,1 | 62,6 | 392 | 88,2 | |
| | 11,0 | 21,1 | 26,9 | 208 | 2,78 | 46,9 | 67,2 | 417 | 93,7 | |
| | 12,5 | 23,6 | 30,0 | 225 | 2,74 | 50,6 | 73,6 | 450 | 101 | |
| 101,6 | 4,0 | 9,63 | 12,3 | 146 | 3,45 | 28,8 | 38,1 | 293 | 57,6 | 0,319 |
| | 4,5 | 10,8 | 13,7 | 162 | 3,44 | 31,9 | 42,5 | 324 | 63,8 | |
| | 5,0 | 11,9 | 15,2 | 177 | 3,42 | 34,9 | 46,7 | 355 | 69,9 | |
| | 5,6 | 13,3 | 16,9 | 195 | 3,40 | 38,4 | 51,7 | 390 | 76,9 | |
| | 6,4 | 15,0 | 19,1 | 218 | 3,37 | 42,9 | 58,1 | 436 | 85,8 | |
| | 7,1 | 16,5 | 21,1 | 237 | 3,35 | 46,6 | 63,5 | 473 | 93,2 | |
| | 8,0 | 18,5 | 23,5 | 260 | 3,32 | 51,1 | 70,3 | 519 | 102 | |
| | 8,8 | 20,1 | 25,7 | 279 | 3,30 | 54,9 | 76,0 | 557 | 110 | |
| | 10,0 | 22,6 | 28,8 | 305 | 3,26 | 60,1 | 84,2 | 611 | 120 | |
| | 11,0 | 24,6 | 31,3 | 326 | 3,23 | 64,2 | 90,7 | 652 | 128 | |
| 73,0 | 3,6 | 6,16 | 7,85 | 47,4 | 2,46 | 13,0 | 17,4 | 94,8 | 26,0 | 0,229 |
| | 4,0 | 6,81 | 8,67 | 51,8 | 2,44 | 14,2 | 19,1 | 104 | 28,4 | |
| | 4,5 | 7,60 | 9,68 | 57,0 | 2,43 | 15,6 | 21,1 | 114 | 31,3 | |
| | 5,0 | 8,38 | 10,7 | 62,1 | 2,41 | 17,0 | 23,2 | 124 | 34,0 | |
| | 5,6 | 9,31 | 11,9 | 67,8 | 2,39 | 18,6 | 25,5 | 136 | 37,1 | |
| | 6,4 | 10,5 | 13,4 | 74,9 | 2,37 | 20,5 | 28,5 | 150 | 41,1 | |
| | 7,1 | 11,5 | 14,7 | 80,7 | 2,34 | 22,1 | 31,0 | 161 | 44,2 | |
| | 8,0 | 12,8 | 16,3 | 87,6 | 2,32 | 24,0 | 34,0 | 175 | 48,0 | |
| | 8,8 | 13,9 | 17,7 | 93,2 | 2,29 | 25,5 | 36,5 | 186 | 51,0 | |
| | 10,0 | 15,5 | 19,8 | 101 | 2,26 | 27,6 | 40,0 | 201 | 55,2 | |
| 11,0 | 16,8 | 21,4 | 106 | 2,23 | 29,1 | 42,7 | 212 | 58,2 | | |

Figura 3.19: Dimensões e propriedades geométricas de um tubo de seção circular (VALLOUREC).

- Banzos:

$$N_e = \frac{\pi^2(200 \times 10^2)(218)}{(0,9 \times 10)^2} = 531252,8 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{1 \times 8107,32 \times (300 \times 10^{-3})}{531252,8}} = 0,07$$

$$\chi = \frac{1}{(1 + 0,07^{4,48})^{1/2,24}} = 0,999$$

$$N_{c,Rd} = \frac{0,999 \times 8107,32 \times (300 \times 10^{-3})}{1,1} = 2208,9 \text{ kN}$$

-Diagonais:

$$N_e = \frac{\pi^2(200 \times 10^2)(87,6)}{(0,9 \times 10)^2} = 213475,9 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{1 \times 4185,4 \times (300 \times 10^{-3})}{213475,9}} = 0,08$$

$$\chi = \frac{1}{(1 + 0,08^{4,48})^{1/2,24}} = 0,999$$

$$N_{c,Rd} = \frac{0,999 \times 4185,4 \times (300 \times 10^{-3})}{1,1} = 1140,3 \text{ kN}$$

3.3.4.3 Momento fletor resistente de cálculo

O momento fletor resistente pode ser definido pelo momento fletor de plastificação da seção transversal, dada pelo produto do módulo de resistência plástico (z) pela resistência de escoamento do aço (f_y).

$$M_{Rd} = M_{pl} = z f_y \quad (3.8)$$

O módulo de resistência plástico foi retirado do catálogo de tubos estruturais da empresa VALLOUREC S.A, apresentado na Figura 3.19.

Portanto,

$$M_{Rd} = 58,1 \times 30 = 1743 \text{ kN.cm} = 17,43 \text{ kN.m} \rightarrow \text{para banzos}$$

$$M_{Rd} = 34 \times 30 = 1020 \text{ kN.cm} = 10,20 \text{ kN.m} \rightarrow \text{para diagonais}$$

3.3.5 Modos de falha da ligação luva

Para o dimensionamento da capacidade resistente da ligação luva foi utilizada a Tabela 1.

A primeira verificação a ser analisada é a esbelteza relativa (λ_{rel}).

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda_{TE}}{\lambda_{TI}}; \lambda_{TE} = \frac{D_{ext}}{t_{ext}} = \frac{101,6}{6,4} = 15,875; \lambda_{TI} = \frac{D_{int}}{t_{int}} = \frac{73}{8} = 9,125$$

Logo,

$$\lambda_{rel} = 1,74 \rightarrow Ok$$

Os cálculos para identificação da resistência para o escoamento da seção bruta (ESB) e ruptura da seção líquida (RSL) podem ser encontrados no tópico 3.3.4.1 desse trabalho, já que a formulação para a verificação das barras pela força axial de tração corresponde à mesma para a avaliação da resistência da ligação. Entretanto, para a utilização da formulação para RSL, faz-se necessário a verificação conforme (3.9) e (3.10)

$$\frac{l_c}{D_{ext}} \leq 3,0 \quad (3.9)$$

$$\frac{150}{101,6} = 1,47 \rightarrow Ok$$

$$\frac{d_b}{\lambda_{rel}} \leq 12,0 \quad (3.10)$$

$$\frac{19,05}{1,74} = 10,94 \rightarrow Ok$$

O modo de falha por cisalhamento do parafuso pode ser verificado a partir da equação (2.8).

$$A_b = 0,25 \times \pi \times 19,05^2 = 285,02 \text{ mm}^2$$

$$F_{v,Rd} = 2 \times 6 \times \frac{0,4 \times (2,8502 \times 10^{-4}) \times (825 \times 10^3)}{1,35}$$

$$F_{v,Rd} = 836,06 \text{ kN}$$

Da equação (2.11) tem-se a resistência para a ovalização do furo dada por:

$$F_{C,Rd} = 2 \times 6 \times \frac{19,05 \times 6,4 \times 415 \times 10^{-3}}{1,35} = 449,75 \text{ kN}$$

Para a flexão dos parafusos, a partir da equação (2.17), tem-se:

$$x = \frac{(101,6 - 6,4) - (73 - 8)}{2} = 15,1$$

$$5,75 \leq \frac{D_{ext}}{db} \leq 7,68$$

$$\frac{D_{ext}}{db} = \frac{101,6}{19,05} = 5,3 \rightarrow Ok$$

$$F_{b,Rd} = \frac{6 \times (635 \times 10^{-3}) \times 678,71 \times \pi \times 73}{3,5 \times 20,65 \times 15,1} / 1,1$$

$$F_{b,Rd} = 494 \text{ kN}$$

4 RESULTADOS

Neste item, são apresentados os resultados do dimensionamento do sistema, com base nas formulações apresentadas no tópico 3, permitindo uma análise detalhada do comportamento estrutural dos sistemas treliçados utilizados no mezanino, assim como a capacidade resistente da ligação implementada entre as barras da treliça, a ligação “luva”. O cálculo dos estados limites últimos dos tubos segue as diretrizes da NBR 8800 (2008) e NBR 16239 (2013).

Os valores dos esforços de cálculo solicitantes para cada barra do módulo dos sistemas treliçados são apresentados nas tabelas: Tabela 5, para as treliças T01 e T03; Tabela 6 para as treliças T04 e T05; Tabela 7 para a treliça T02. A fim de facilitar a verificação do módulo treliçado foi considerado apenas o maior valor de cada esforço.

Tabela 5: Esforços solicitantes de cálculo para T01 e T03.

| | | Banzo Superior | Banzo Inferior | Diagonais | UN |
|------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------|
| Esforço de tração | $N_{t,sd}$ | - | 62,61 | 69,90 | kN |
| Esforço de compressão | $N_{c,sd}$ | 168,05 | 115,33 | 69,90 | kN |
| Momento | M_{sd} | 2,47 | - | - | Kn.m |

Tabela 6: Esforços solicitantes de cálculo para T04 e T05.

| | | Banzo Superior | Banzo Inferior | Diagonais | UN |
|------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------|
| Esforço de tração | $N_{t,sd}$ | - | 67,80 | 113,00 | kN |
| Esforço de compressão | $N_{c,sd}$ | 243,46 | 184,91 | 113,00 | kN |
| Momento | M_{sd} | 3,21 | - | - | kN.m |

Tabela 7: Esforços solicitantes de cálculo para T02.

| | | Banzo Superior | Banzo Inferior | Diagonais | UN |
|------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------|
| Esforço de tração | $N_{t,sd}$ | - | 141,64 | 137,00 | kN |
| Esforço de compressão | $N_{c,sd}$ | 408,26 | 274,95 | 137,00 | kN |
| Momento | M_{sd} | 2,08 | - | - | kN.m |

Os resultados da força resistente à compressão, tração e momento fletor estão dispostos na Tabela 8. Ao comparar com os valores de solicitações mostrados na Tabela 8, percebe-se que a capacidade resistente das barras é superior às solicitações, indicando que o dimensionamento foi satisfatório. Esses resultados são considerados positivos, pois em todos os casos os valores de $N_{t,Rd}$, $N_{c,Rd}$ e M_{Rd} são maiores que as respectivas solicitações $N_{t,sd}$, $N_{c,sd}$ e M_{sd} .

Tabela 8: Verificação das barras

| | | Banzo Superior | Banzo Inferior | Diagonais | UN |
|--|------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------|
| Força axial resistente à tração | $N_{t,Rd}$ | 441,4 | 441,4 | 502,3 | kN |
| Força axial resistente à compressão | $N_{c,Rd}$ | 2208,8 | 2208,8 | 1140,3 | kN |
| Momento fletor resistente | M_{Rd} | 17,43 | 17,43 | 10,20 | kN.m |

Para o dimensionamento da ligação luva, todas as propriedades geométricas características, aplicadas nas formulações, foram resumidas e apresentadas na

Tabela 9, assim como as verificações necessárias para utilização apropriadas das equações dos seus respectivos modos de falha.

Tabela 9: Propriedades geométricas da luva

| Descrição | Simbologia | Valor | Unidade |
|---|---------------------|---------|-----------------|
| Esbeltez do tubo externo | λ_{TE} | 15,875 | - |
| Esbeltez do tubo interno | λ_{TI} | 9,125 | - |
| Área bruta da seção transversal do tubo | A_g | 8107,32 | mm ² |
| Área líquida efetiva da seção do tubo | A_e | 1435,58 | mm ² |
| Área líquida da seção do tubo | A_n | 1914,11 | mm ² |
| Área da seção do parafuso | A_b | 285,02 | mm ² |
| Coefficiente de redução da área líquida | C_t | 0,75 | - |
| Excentricidade da ligação | e_c | 50,8 | mm |
| Diâmetro do furo (d_b + folga) | d | 20,65 | mm |
| Distância de furo a borda | L_{f1} | 40 | mm |
| Distância de furo a furo | L_{f2} | 55 | mm |
| Comprimento efetivo da ligação | l_c | 205 | mm |
| Parâmetro x | x | 15,1 | mm |
| Verificações | | | |
| Parâmetro para o Modo 2: Ruptura da seção líquida | l_c/D_{ext} | 1,47 | |
| Parâmetro para o Modo 2: Ruptura da seção líquida | d_b/λ_{rel} | 10,94 | |
| Parâmetro para o Modo 5: Flexão dos parafusos | D_{ext}/d_b | 5,3 | |
| Esbeltez relativa | λ_{rel} | 1,74 | |

A Tabela 10 apresenta o resultado da capacidade resistente de cálculo para os 5 modos de falha da ligação luva.

Tabela 10: Resistência calculada da luva.

| | | | |
|---|-------------|--------|----|
| Modo 1: Escoamento da seção bruta (ESB) | $N_{t,Rd1}$ | 2211,0 | kN |
| Modo 2: Ruptura da seção líquida (RSL) | $N_{t,Rd2}$ | 441,4 | kN |
| Modo 3: Cisalhamento do parafuso (CP) | $F_{v,Rd}$ | 836,06 | kN |
| Modo 4: Ovalização dos furos (OF) | $F_{c,Rd}$ | 449,75 | kN |
| Modo 5: Flexão do parafuso (FP) | $F_{b,Rd}$ | 494,0 | kN |

Com isso, a força resistente de cálculo da ligação, (F_{Rd}), dada pela equação (2.19), correspondente ao menor valor entre os 5 modos de falha, equivale à ruptura da seção líquida, igual a 441,4 kN. Comparando-se ao resultado obtido pelas tabelas 4, 5 e 6, onde apresentam os valores das forças solicitantes de cálculo (F_{Sd}), é possível fazer a verificação apresentada na expressão (2.18), em que $F_{Sd} \leq F_{Rd}$.

Observa-se que, o dimensionamento da ligação é válido para todas treliças estudadas, já que os valores de F_{Rd} foram maiores que os solicitados pela luva.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como um dos objetivos, desenvolver e dimensionar um módulo treliçado utilizando perfis tubulares circulares de aço, empregando a ligação luva como elemento de emenda entre as barras. A proposta buscou analisar, por meio de uma aplicação prática, nesse caso específico, as vigas treliçadas da estrutura de um mezanino, considerando as formulações de dimensionamento das prescrições normativas atuais e das propostas para ligação tipo luva já investigadas por SILVA, 2012, AMPARO 2014 e AMPARO,2018.

É importante destacar a versatilidade e praticidade da utilização da ligação tipo luva, o principal motivo para sua escolha na estrutura. Esse tipo de ligação permite alcançar vãos de diferentes dimensões, utilizando barras de variados comprimentos, facilitando a montagem, transporte e construção de estruturas. Além disso, a padronização oferece a vantagem de permitir alterações nas dimensões do projeto sem a necessidade de modificar o processo de fabricação das barras, tornando o sistema mais eficiente.

Ademais, o detalhamento da estrutura e sua visualização em 3D por meio do software TEKLA, permitiram uma análise mais completa da estrutura. Isso possibilitou identificar a melhor forma de posicionar corretamente as barras e ligações, além de proporcionar uma visualização realista de como a estrutura se comportaria em uma aplicação prática no mercado da construção civil. A utilização desse recurso contribuiu para aumentar a precisão no dimensionamento das peças e otimizar o processo de montagem.

Com relação aos resultados obtidos pelos dimensionamentos dos perfis e da ligação, a metodologia de cálculo se mostrou favorável para as treliças. Os resultados obtidos foram válidos e demonstram a eficácia do uso da ligação luva em sistemas treliçados, permitindo a simulação de uma possível aplicação dessa forma de conexão em uma situação real.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros pode-se sugerir:

- Avaliação e dimensionamento das demais ligações presentes na estrutura, além da verificação de solda.
- Utilizar outras dimensões de vãos como comparação.
- Avaliar se a distribuição de diagonais e montantes em uma treliça pode ser importante para o posicionamento da ligação luva.
- Simular a estrutura em outro programa, como por exemplo, SAP2000, que oferece valores mais precisos.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 16239. **Projeto de Esruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 85. 2013.

ABNT NBR 8261. **Tubos de aço-carbono, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2019.

ABNT NBR 8800. **Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2024.

AFA ARQ. **André Sá Francisco Mota Arquitetos**, 2007. Disponível em: <<http://www.afa.arq.br/projeto/salvador-shopping/>>. Acesso em: 02 out. 2024.

AMPARO, Lucas R. Dissertação de mestrado. **ANÁLISE TEÓRICO - EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES TIPO LUVA COMPOSTAS POR PERFIS TUBULARES COM PARAFUSOS EM LINHA E CRUZADOS**, Ouro Preto, Março 2014.

AMPARO, Lucas R. Dissertação de doutorado. **ESTUDO DE LIGAÇÕES TIPO LUVA EM PERFIS TUBULARES**, Ouro Preto, dezembro 2018.

ARAÚJO, Afonso H. M. et al. **Projeto de Estruturas de Edificações com Perfis Tubulares de Aço**. Belo Horizonte. 2016.

ASTM 500. **Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes**. ASTM International. West Conshohocken. 2021.

ASTM A501. **Standard Specification for Hot-Formed and Cold-Formed Carbon Steel Structural Tubes**. ASTM Internacional. West Conshohocken. 2023.

DA SILVA, Janaína M. Dissertação de mestrado. **ANÁLISE TEÓRICO - EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES TUBULARES TIPO LUVA**, Ouro Preto, Agosto 2012.

DE OLIVEIRA, Matheus M. Dissertação de mestrado. **ANÁLISE DE LIGAÇÕES TIPO LUVA SOB COMPRESSÃO**, Ouro Preto, julho 2019.

HAMBURG AIRPORT. Disponível em: <<https://www.hamburg-airport.de/en>>.

METFORM. Steel Deck; A solução definitiva em lajes. **AEC WEB**. Disponível em: <[https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/metform/steel_deck_metform\[1\].pdf](https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/metform/steel_deck_metform[1].pdf)>. Acesso em: out. 2024.

NETO, Samuel D. O. Trabalho de Conclusão de Curso. **LIGAÇÃO TIPO LUVA APLICADA EM UMA**, Ouro Branco, junho 2022.

REVISTA Projeto. **Arena Corinthians**: Cobertura, 2014. Disponível em: <<https://www.revistaprojeto.com.br/acervo/arena-corinthians-cobertura/>>. Acesso em: 02 out. 2024.

SAMARRA, Fábio A. ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE TRELIÇAS TUBULARES PLANAS PARA COBERTURAS PADRONIZADAS. **Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**, Campinas, Dezembro 2007.

VALLOUREC. Catálogo Tubos Estruturais. **AEC WEB**. Disponível em: <<https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/20437/24986/126catalogo-tubos-estruturais.pdf>>. Acesso em: out. 2024.

VALLOUREC S.A. Catálogo Aços Estruturais. **Vallourec**, 2023. Disponível em: <<https://www.vallourec.com/app/uploads/sites/2/2023/10/BR-Catalogo-de-Acos-Estruturais.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2024.