



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIA AURILENE ROCHA

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO-
CONCRETO COM STUD BOLT E CONECTOR TRELIÇADO**

RUSSAS

2023

MARIA AURILENE ROCHA

DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO-
CONCRETO COM STUD BOLT E CONECTOR TRELIÇADO

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

Orientador: Prof. DSc. Jerfson Moura Lima.

RUSSAS

2023

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

R574d Rocha, Maria Aurilene.
Dimensionamento e análise de custo de vigas mistas de aço-concreto com stud bolt e conector treliçado /
Maria Aurilene Rocha. – 2023.
62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Jerfson Moura Lima..

1. viga mista de aço-concreto. 2. conector de cisalhamento treliçado. 3. stud bolt. I. Título.
CDD 620

MARIA AURILENE ROCHA

DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO-
CONCRETO COM STUD BOLT E CONECTOR TRELIÇADO

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

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. MSc. Eric Mateus Fernandes Bezerra
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. DSc. Jorge Douglas Bonilla Rocha
Universidade de Brasília (UnB)

A Deus e aos meus queridos pais!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido a vida e por ter me dado força para superar todos os obstáculos que encontrei ao longo da realização desse sonho. Sua benevolência me permitiu ter saúde e determinação para não desistir.

Aos meus pais, Adalberto Pessoa da Rocha e Maria do Socorro da Rocha, sou imensamente grata por todo o apoio e contribuição significativa aos meus valores. Obrigada por nunca medirem esforços para me proporcionar o melhor. Este trabalho é a prova de que todos os seus sacrifícios valeram a pena.

Aos meus irmãos, em especial a Erenice, Elice e Edilberto, agradeço o apoio e incentivo durante todos esses anos de graduação.

Ao meu padrinho que de maneira generosa contribuiu financeiramente na minha formação e acreditou em meu potencial. Só Deus pode retribuir a bondade de seu coração. Agradeço ao Luiz Júnior, por ter acreditado em mim e ter me escolhido dentre muitos que também necessitavam, não encontro palavras que expresse minha eterna gratidão.

Ao meu namorado, João Victor, sou muito grata por ter me dado força, incentivo e apoio incondicional para vencer essa etapa da vida acadêmica, gratidão por nunca sair do meu lado.

Agradeço a todos os professores, em especial ao DSc Jerfson Moura Lima, meu orientador, pelos ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional. Obrigada por me exigir mais do que eu acreditava ser capaz de realizar.

Por fim, agradeço aos meus amigos Éric, Vivian, Laís, Letícia, Gilmar, Evandro e Jordão por estarem comigo nesses anos, me apoiando e sendo meu amparo nos momentos difíceis. Vocês são verdadeiros amigos que quero em minha vida.

RESUMO

As vigas mistas de aço-concreto são elementos estruturais constituídos por uma laje de concreto armado sobre a mesa superior de um perfil de aço. A ligação entre esses dois elementos é feita por conectores de cisalhamento. Dentre os mais variados tipos, o *stud bolt*. Contudo, este possui um custo relativamente alto, inviabilizando muitas vezes o uso dos sistemas mistos. A vista disso, muitas pesquisas buscam desenvolver conectores alternativos que possuam baixo custo e que garantam um desempenho adequado às vigas mistas frente às solicitações, dentre os quais pode-se destacar o conector treliçado. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo realizar a comparação entre os custos da aplicação dos conectores *stud bolt* e treliçado em vigas mistas. Foram utilizadas as formulações na NBR 8800:2008 e no trabalho de Lima (2021) para dimensionar as vigas. Com isso, foi possível obter a quantidade de conectores *stud bolts* e treliçados. Por fim, foi elaborada a composição de insumos de cada conector e, portanto, determinado o custo unitário de ambos. Foi verificado que o custo unitário do conector treliçado foi aproximadamente 46% inferior comparado ao *stud bolt*. Além disso, o custo final dos conectores treliçados para a estrutura foi aproximadamente 51% inferior em relação aos *studs bolts*. Isso revela que a execução de vigas mistas com conector treliçado apresenta boa viabilidade econômica.

Palavras-chave: viga mista de aço-concreto; conector de cisalhamento treliçado; *stud bolt*.

ABSTRACT

Steel-concrete composite beams are structural elements consisting of a reinforced concrete slab on the upper flange of a steel profile. The connection between these two elements is made using shear connectors. Among the most varied types, the stud bolt. However, this has a relatively high cost, often making the use of mixed systems unfeasible. In view of this, much research seeks to develop alternative connectors that have low cost and that guarantee adequate performance for composite beams in the face of requests, among which the lattice connector can be highlighted. In this sense, this work aims to compare the costs of applying stud bolt and truss connectors to composite beams. The formulations in NBR 8800:2008 and in the work of Lima (2021) were used to size the beams. With this, it was possible to obtain the number of stud bolts and truss connectors. Finally, the composition of inputs for each connector was prepared and, therefore, the unit cost of both was determined. It was found that the unit cost of the lattice connector was approximately 46% lower compared to the stud bolt. Furthermore, the final cost of truss connectors for the structure was approximately 51% lower than stud bolts. This reveals that the execution of composite beams with a lattice connector presents good economic viability.

Keywords: composite steel-concrete beam; truss shear connector; stud bolt.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de estrutura mista.....	11
Figura 2 - Conector <i>stud bolt</i> e perfil U.....	12
Figura 3 - Conector de cisalhamento treliçado.....	13
Figura 4 - Conector treliçado reto.....	13
Figura 5 - Vigas Mista de aço e concreto.....	17
Figura 6 - Comportamento viga mista.....	18
Figura 7 - Comportamento do conector <i>stud bolt</i>	21
Figura 8 - Geometria do conector treliçado isósceles.....	23
Figura 9 – Geometria do conector treliçado reto.....	23
Figura 10 - Modelos experimentais após os ensaios de <i>push out</i>	24
Figura 11 - LNP na interface da viga mista.....	26
Figura 12 - LNP na laje da viga mista.....	27
Figura 13 - LNP no perfil de aço.....	28
Figura 14 - LNP na laje e no perfil da viga.....	29
Figura 15 – Fluxograma da organização do trabalho.....	35
Figura 16 - Planta baixa da estrutura.....	36
Figura 17 - Lançamento das vigas.....	37
Figura 18 - Divisão dos grupos de vigas.....	37
Figura 19 – Geometria do conector <i>stud bolt</i>	40
Figura 20 – Conector treliçado isósceles.....	40
Figura 21 - Quantidade de conectores.....	44
Figura 22 – Número total de conectores.....	45
Figura 23 – Instalação do conector <i>stud bolt</i>	53
Figura 24 – Instalação do conector treliçado.....	56
Figura 25 - Custo total por grupo de vigas.....	57
Figura 26 – Custo total dos conectores da edificação.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Divisão dos grupos de vigas e suas características.....	38
Tabela 2 – Equações utilizadas no dimensionamento.....	39
Tabela 3 - Momento solicitante, resistente e grau de interação.....	42
Tabela 4 – Resistências dos conectores de cisalhamento.....	43
Tabela 5 - Esforço cortante solicitante e resistente de cálculo.....	45
Tabela 6 - Resultados de flechas.....	46
Tabela 7 - Detalhamento das vigas mistas para cada grupo (cm).....	48
Tabela 8 - Composição do conector <i>stud bolt</i>	52
Tabela 9 - Composição do conector treliçado.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Breve histórico das estruturas mistas	15
2.2	Vigas mistas de aço-concreto	16
2.3	Conector de cisalhamento	19
2.4	Dimensionamento de vigas mistas de aço-concreto ao momento fletor de acordo com a NBR 8800:2008	25
2.5	Verificação de vigas mistas de aço-concreto a força cortante de acordo com a NBR 8800:2008	31
2.6	Verificação do estado limite de serviço	32
2.7	Levantamento de custos	33
3	METODOLOGIA	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Dimensionamento das vigas mistas de aço-concreto	42
4.1.1	<i>Dimensionamento à flexão</i>	42
4.1.2	<i>Verificação do esforço cortante</i>	45
4.1.3	<i>Verificação do estado limite de serviço</i>	46
4.1.4	<i>Detalhamento das vigas mistas</i>	47
4.2	Composição de custos	52
4.2.1	<i>Composição unitária</i>	52
4.2.2	<i>Custo total dos conectores da edificação</i>	57
5.	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas estruturais de concreto convencional e de aço, têm sido amplamente utilizados na construção civil em todo o mundo por muitos anos. No entanto, o mercado da construção civil está cada vez mais exigente, buscando produtividade, qualidade e sustentabilidade para os empreendimentos. Nesse contexto, surgem novos sistemas estruturais, como o sistema de estruturas mistas, que oferecem vantagens significativas, como o aproveitamento eficiente dos materiais e a redução de custos. A Figura 1 ilustra um exemplo desse sistema estrutural.

Figura 1- Exemplo de estrutura mista.



Fonte: Archdaily (2015)

Ao longo dos anos, a estrutura mista foi se desenvolvendo, para garantir o funcionamento eficiente da combinação aço-concreto. A viga mista de aço-concreto consiste em uma laje de concreto armado unida mecanicamente a um perfil de aço I. Uma de suas principais vantagens é que a laje de concreto trabalha preponderantemente sob os esforços de compressão e o perfil de aço trabalha sob os esforços de tração, proporcionando uma resistência superior em comparação aos outros sistemas convencionais. Além disso, reduz o consumo de material quando comparada a vigas de aço ou concreto armado, o que amplia sua aplicação em diversos empreendimentos.

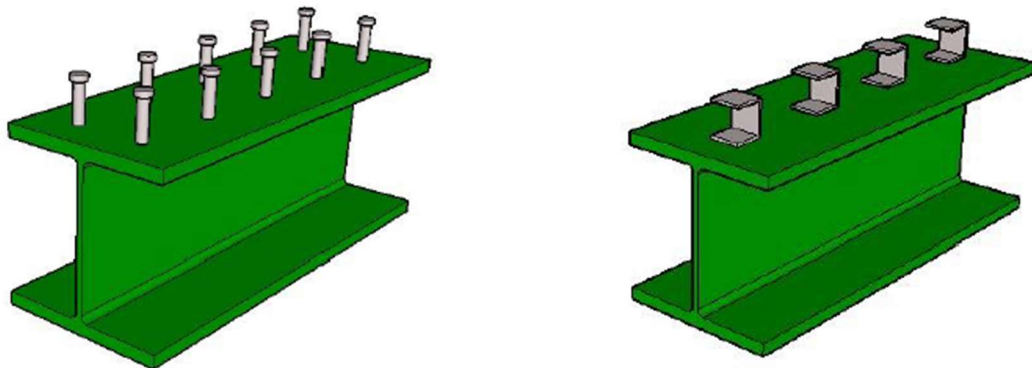
Para garantir a eficiência da viga mista, é essencial que os elementos de aço e concreto trabalhem em conjunto, o que é alcançado por meio de uma interação chamada conectores de cisalhamento. Esses conectores atuam como uma ligação mecânica, transferindo os esforços longitudinais e horizontais entre a laje de concreto e o perfil de aço, garantindo que a deformação entre os materiais ocorra de forma simultânea. Os esforços longitudinais são os

deslizamentos que ocorrem entre a superfície do perfil e a laje, chamados de *slip* e os esforços transversais são a separação transversal entre os materiais, chamada de *uplift*.

A interação entre os materiais pode ser classificada em total e parcial. A interação total ocorre quando o número de conectores distribuídos ao longo da viga impede integralmente o *slip*. Por outro lado, a interação parcial ocorre quando não há impedimento integral do *slip* devido ao número reduzido de conectores.

Dentre os conectores de cisalhamento disponíveis, apenas o *stud bolt* e perfil U são normatizados e conseqüentemente os mais utilizados, sendo o *stud bolt* o mais adotado em diversas estruturas mistas de aço-concreto (CÂNDIDO-MARTINS, COSTA-NEVES E VELLASCO, 2010; KIM et al. 2016; NGUYEN E KIM 2009). Apesar da alta produtividade de execução e da capacidade de livre disposição das armaduras de flexão da laje, o *stud bolt* apresenta desvantagens, como capacidade resistente relativamente baixa, necessidade de equipamento de instalação específico e de custo elevado e baixa resistência a fadiga. A Figura 2 ilustra a geometria dos conectores *stud bolt* e perfil U.

Figura 2 - Conector *Stud Bolt* e Perfil U.

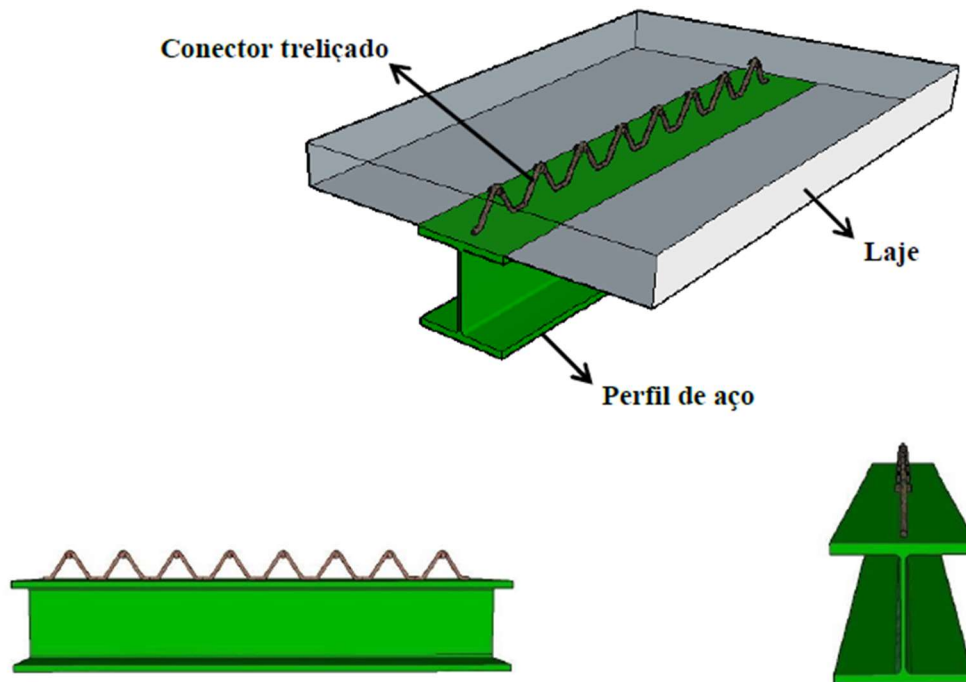


Fonte: Lima (2021).

Com o objetivo de superar essas desvantagens, que muitas vezes impedem o uso do sistema misto, várias pesquisas vêm sendo realizadas para desenvolver conectores de cisalhamento alternativos. Entre essas pesquisas, destaca-se o conector treliçado desenvolvido por Barbosa (2016) e estudado por Lima (2021). Em seus ensaios experimentais, os autores constataram que o conector treliçado possui uma resistência superior ao *stud bolt* e afirmam que sua fabricação e instalação tem um custo menor em comparação ao *stud bolt*, uma vez que seu material é de baixo custo e sua instalação não depende de equipamentos específicos. Porém, ainda não foram realizados estudos sobre o custo da aplicação desses conectores, especialmente o conector treliçado em vigas mistas de aço-concreto.

O conector de cisalhamento treliçado é produzido com vergalhões de aço CA-50, dobrados em formato triangular e embutido na laje de concreto. É fixado no perfil de aço pela soldagem de suas hastes horizontais. Entre suas vantagens, destacam-se o baixo custo do material, o processo de fabricação simples, que não requer mão de obra especializada, e a geometria adequada para uso em vigas mistas, entre outras. A Figura 3 mostra o conector treliçado isósceles.

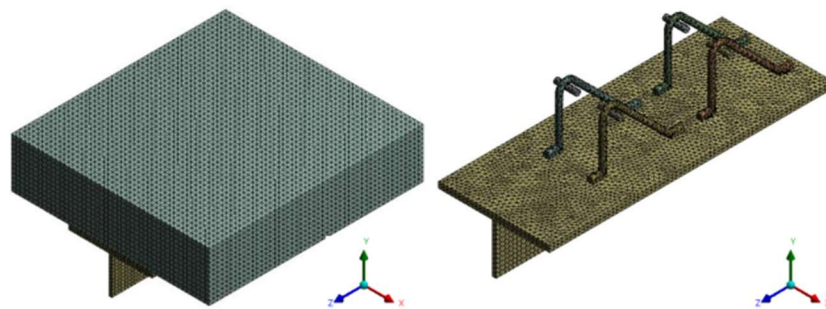
Figura 3 - Conector de cisalhamento treliçado isósceles.



Fonte: Lima (2021).

Além do conector treliçado com forma geométrica isósceles, tem-se o conector treliçado reto, como mostra a Figura 4.

Figura 4: Conector treliçado reto



Fonte: Barbosa (2016).

1.1. Justificativa

Estudos anteriores apontaram que o conector alternativo treliçado mostrou-se mais resistente que o conector *stud bolt*. Os ensaios do tipo push out realizados por Barbosa (2016) e de flexão realizados por Lima (2021) comprovaram que o conector treliçado apresentou uma resistência ao cisalhamento superior comparado ao *stud bolt*. Além disso, o conector treliçado é composto por material de baixo custo, barras de aço CA-50, possuindo alta disponibilidade no mercado da construção civil.

No entanto, não existem estudos que demonstrem a economia proporcionada pela utilização desse conector alternativo em vigas mistas de aço-concreto. Como resultado, o mercado não possui dados concretos que comprovem a redução de custos associada a esse conector alternativo, dado que um dos principais problemas da estrutura mista é o custo. Portanto, este trabalho busca preencher essa lacuna, fornecendo um entendimento mais aprofundado sobre o impacto econômico desse conector na indústria da construção civil.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo comparativo do custo dos conectores treliçados e *stud bolt* aplicados em vigas mistas de aço-concreto. Como objetivos específicos tem-se

- Realizar a análise e o dimensionamento de uma estrutura constituída por vigas mistas, com conectores *stud bolt* e treliçado;
- Determinar o número de conectores de cada tipo;
- Elaborar a composição de insumos para cada conector;
- Obter o custo unitário de produção e execução dos conectores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentado um breve histórico sobre o surgimento das estruturas mistas, com ênfase no comportamento e nos principais conceitos das vigas mistas de aço-concreto, bem como dos conectores de cisalhamento. Além disso, será abordado o procedimento de dimensionamento das vigas mistas de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, levando em consideração o estado limite último e de serviço. Por fim, serão detalhados os custos e a obtenção dos mesmos por meio de tabelas uniformizadas e padronizadas, de acordo com a região.

2.1. Breve histórico sobre estrutura mista de aço-concreto

Ao longo dos anos, diversos sistemas construtivos foram sendo criados para sanar as necessidades no mercado da construção civil, desde sistemas simples até os mais complexos. De acordo com Alva (2000), eles surgiram a partir do desenvolvimento econômico, técnico e científico e entre eles encontram-se os sistemas mistos aço-concreto, essa combinação de perfis de aço e concreto tem por objetivo aproveitar as qualidades de cada material, não só em termos estruturais como também construtivos.

De acordo com Lima (2021), no sistema estrutural misto, os elementos são dispostos de maneira que o aço seja o principal componente a resistir os esforços de tração e o concreto aos esforços de compressão, com isso os elementos estruturais se tornam mais eficientes em comparação aos elementos estruturais convencionais, tendo em vista que há um aproveitamento maior das características de cada material.

O início dos estudos relacionados à estrutura mista se deu antes da primeira guerra mundial, pela empresa Redpath Brow and Company que realizou uma série de ensaios de sistemas compostos para pisos na Inglaterra (MALITE, 1990). Segundo Malite (1990), a partir desses estudos que foram desenvolvidos no decorrer dos anos, por volta de 1930 o sistema misto, bem como seus métodos de dimensionamento já estavam estabelecidos e sendo empregados em muitas construções de pequenas pontes e edifícios.

Contudo, conforme Malite (1990) apenas na década de 40 que esse sistema foi inserido nas normas da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Já no Brasil, segundo Alva (2000), as estruturas mistas foram normatizadas apenas na década de 80 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR - 8800: “Projeto e

Execução de Estruturas de Aço de Edifícios”, nesta norma é abordado o dimensionamento e execução dos elementos mistos submetidos à flexão.

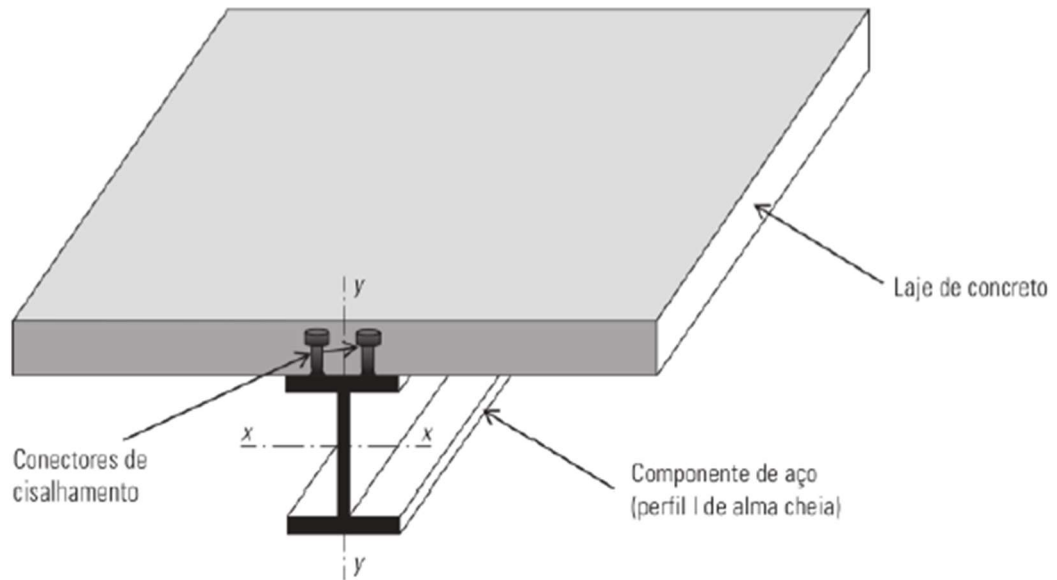
Vale ressaltar que a estrutura mista surgiu a partir do desenvolvimento do concreto armado e das estruturas de aço. De acordo com Alva (2000), nesse sistema, o concreto era, inicialmente, usado para revestir os perfis de aço protegendo-o contra o fogo e a corrosão, nesse contexto a resistência que o concreto oferecia para suportar os carregamentos era desprezada no dimensionamento, sendo portanto, tratado como elemento de revestimento.

A estrutura mista é formada por elementos mistos, ou seja, pilares mistos que de acordo com Silva (2012), os pilares mistos de aço e concreto são compostos por um ou mais perfis de aço que são ligados entre si e trabalham em conjunto com o concreto, podendo sofrer solicitações à compressão ou à flexocompressão. As lajes mistas, segundo Cordeiro (2014), consistem na associação de fôrmas de aço perfilados e concreto armado moldado in loco, essas fôrmas de aço agem não apenas na fase de execução mas possui papel importante, pois fornecem vinculação ao concreto quando ele adquire rigidez, isso ocorre através da transferência do cisalhamento horizontal fazendo-os trabalharem em conjunto como elemento misto. E por fim tem-se as vigas mistas de aço-concreto que são o foco deste estudo e serão abordadas no tópico seguinte.

2.2. Vigas mistas de aço-concreto

Conforme Lima (2021), inicialmente, as vigas mistas de aço-concreto eram pensadas com um perfil de aço revestido por concreto, sendo que a interação entre os materiais acontecia pelo atrito e pela força de adesão. (apud VIEST, 1960). Porém, segundo Lima (2021), esse tipo de interação entre os materiais é imprevisível e com o tempo esse sistema foi sendo substituído por laje de concreto apoiada na mesa superior do perfil de aço e para obter transferências de esforços entre os materiais foi adotado uma conexão mecânica chamada de conector de cisalhamento. A Figura 5 ilustra os componentes da viga mista e suas disposições.

Figura 5 - Vigas Mista de aço e concreto.



Fonte: Fakury (2016).

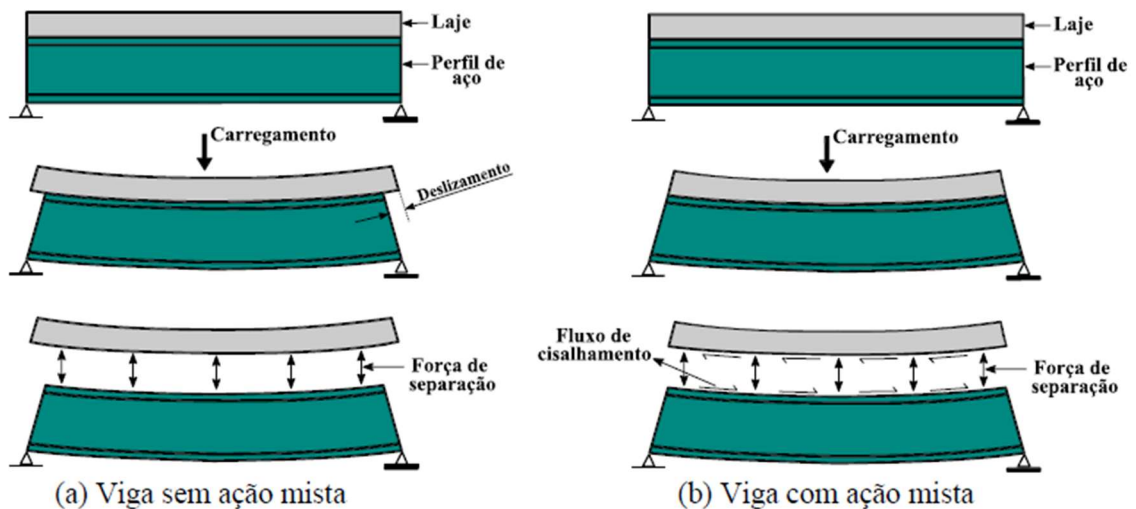
De acordo com Lima (2021), dentre as vantagens deste elemento estrutural misto tem-se o peso próprio geralmente menor em comparação com vigas metálicas e vigas de concreto armado, um perfil de aço com menor altura devido à contribuição da laje na resistência, maior rigidez garantindo a estabilidade global, capacidade de vencer grandes vãos e menor custo de execução.

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, as vigas mistas de aço-concreto são compostas por um componente de aço simétrico em relação ao plano de flexão, geralmente em perfil I, com uma laje de concreto acima de sua mesa superior. A laje pode ser do tipo maciça moldada no local, mista e com pré-laje de concreto pré-moldado. Além disso, deve haver uma ligação mecânica entre a laje e o perfil por meio de conectores de cisalhamento de tal forma que ambos funcionem como um conjunto para resistir à flexão.

Chaves (2009), afirma que as vigas mistas podem ser simplesmente apoiadas ou com continuidade nos apoios. Nesse caso, o sistema misto é mais eficiente, uma vez que o perfil de aço trabalha predominantemente à tração enquanto a laje de concreto à compressão. O autor também destaca que o método construtivo utilizado na laje influencia o comportamento da viga mista. Quando as lajes são escoradas durante a concretagem, os perfis de aço não recebem carregamento, ao contrário do que acontece quando as lajes não são escoradas. Neste último caso, os perfis recebem carregamentos durante a execução, quando o concreto ainda não atingiu resistência, fazendo com que o perfil trabalhe isoladamente e o sistema misto não esteja constituído.

A ação mista ocorre quando dois elementos estruturais conectados entre si deformam como se fossem um único elemento, conforme mostrado na Figura 6b.

Figura 6 - Comportamento da viga mista.



Fonte: Lima (2021).

Conforme demonstrado na Figura 6, existem dois limitantes para garantir a resistência e eficiência da viga mista: o *slip*, que se refere ao deslizamento longitudinal que ocorre entre os elementos, e o *uplift*, que consiste na separação transversal entre os elementos que compõem a viga. De acordo com Lima (2021), como pode-se observar na Figura 6a, uma viga sem conectores, quando submetida ao carregamento, tende a deformar mais na fibra superior do perfil do que na fibra inferior da laje, ou seja, trabalham independentemente entre si, permitindo o deslizamento e a separação entre a interface dos componentes.

Por outro lado, na situação ilustrada na Figura 6b, ocorre um fluxo de cisalhamento na interface, uma vez que os conectores impedem o deslizamento longitudinal e a separação transversal entre os componentes, fazendo com que trabalhem de forma conjunta. Lima (2021), ressalta que o comportamento das vigas mistas depende da conexão entre os seus componentes, ou seja, dos conectores de cisalhamento, os quais limitam a ocorrência de *slip* e *uplift*.

Segundo Fakury (2016), o fluxo de cisalhamento que gera uma força horizontal (F_h) é considerado entre a seção de momento máximo e cada seção adjacente de momento nulo, ou seja, é considerado entre o ponto onde não há deslizamento relativo entre a laje e o perfil e o ponto onde o deslizamento é máximo. Essa força pode ser expressa pela Equação (1):

$$F_{hd} \leq \left\{ \begin{array}{l} 0,85 \cdot b \cdot t_c \\ A_a \cdot f_{yd} \end{array} \right\} \quad (1)$$

onde F_{hd} é a força horizontal de cálculo, f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto, b é a largura efetiva da laje de concreto, t_c é a espessura da laje, A_a é a área total do perfil de aço e f_{yd} é a resistência de cálculo do aço. A obtenção dessa força horizontal parte do princípio de que esse esforço se iguala, no limite, a menor capacidade, entre as capacidades da laje de concreto, que corresponde a sua força máxima de compressão que causa o colapso da peça, e do perfil de aço, que corresponde à sua força máxima de tração que causa o escoamento da peça.

O grau de interação entre os componentes da viga mista pode ser completo ou parcial. Segundo Lima (2021), a interação completa ocorre quando não há deslizamento na interface. No entanto, devido à prática, é impossível evitar completamente o deslizamento, já que o fluxo de cisalhamento tende a deformar os conectores e, conseqüentemente, gerar deslizamentos. Por outro lado, a interação parcial ocorre quando o deslizamento se desenvolve na interface. As vigas mistas com interação parcial costumam ser mais econômicas, pois permitem a redução do número de conectores sem diminuir significativamente o momento resistente.

De acordo com Fakury (2016), para que haja interação completa, o número de conectores (n) de cada lado da seção de momento fletor solicitante máximo deve ser suficiente para resistir ao esforço horizontal (F_{hd}). Caso contrário, se não for suficiente, tem-se um grau de interação parcial. Para determinar esse grau de interação, utiliza-se a Equação (2):

$$\alpha = \frac{n \cdot Q_{Rd}}{F_{hd}} \quad (2)$$

Onde Q_{Rd} é a força resistente de cálculo de um conector. Para $\alpha \geq 1$, a viga mista possui interação completa (nesse caso adota-se $\alpha = 1$); $\alpha_{min} \leq \alpha < 1$, a viga mista possui interação parcial. Para que a viga seja considerada como mista, seu grau de interação deve ser maior ou igual ao mínimo, que é determinado pela seguinte condição:

$$\alpha_{min} \geq \left\{ \frac{1 - E/578 \cdot f_y \cdot (0,75 - 0,03 \cdot L_e)}{0,04} \right\} \quad (3)$$

onde L_e é o vão da viga mista e deve ser menor ou igual a 25 m.

2.3. Conector de cisalhamento

Conforme Barbosa (2016) os conectores de cisalhamento são dispositivos mecânicos essenciais para resistir às forças que se desenvolvem na interface entre o perfil de aço e a laje em uma viga mista de aço-concreto. Eles podem ser soldados ou cravados nos perfis de aço.

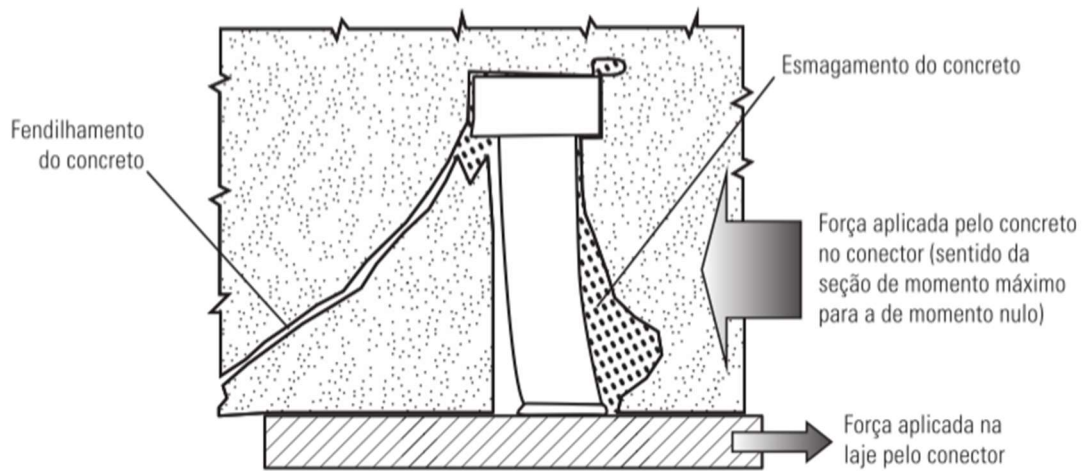
De acordo com Tristão (2002), os conectores de cisalhamento são classificados como flexíveis e rígidos, dependendo da relação entre a força no conector e o deslocamento relativo entre o aço e o concreto. Segundo Lima (2021), conectores flexíveis deformam-se sob as cargas de serviço, o que pode ocasionar o deslizamento na interface dos materiais, enquanto os conectores rígidos não sofrem deformações sob as cargas de serviço, o que reduz a ocorrência de deslizamentos. É importante ter cuidado ao projetar conectores rígidos, pois seu modo de ruptura é frágil, podendo resultar em esmagamento ou cisalhamento do concreto.

Fakury (2016) destaca que o conector pino com cabeça ou *stud bolt* como um dos mais utilizados e normalizados pela ABNT NBR 8800:2008. Este conector é composto por um fuste projetado para funcionar como eletrodo de solda por arco elétrico e, após a soldagem, atua como conector. Possui uma cabeça com dimensões padronizadas para cada diâmetro, sendo fabricado com o aço ASTM A108 - Grau 1020, com resistência ao escoamento (f_{yCS}) de 345 MPa e resistência à ruptura (f_{UCS}) de 415 MPa. A soldagem desse conector é geralmente realizada utilizando uma pistola de soldagem especial controlada por temporizador, o que contribui para seu elevado custo de instalação.

Conforme a NBR ABNT 8800:2008, os conectores pino com cabeça devem ter, após sua instalação, um comprimento mínimo igual a quatro vezes o diâmetro para serem considerados dúcteis. Quando soldados sobre a mesa do perfil de aço, podem sofrer uma redução máxima de 5 mm em seu fuste.

De acordo com Fakury (2016), a função do conector é evitar o deslizamento e o descolamento vertical entre os elementos que compõem a viga mista. Este por sua vez, fica submetido a um esforço horizontal, onde seu fuste está predominantemente sujeito à tração e deformação, como ilustrado na Figura 7. Essa deformação gera tensões no concreto, levando à ocorrência de dois estados limites últimos: a ruptura do conector por tração e a ruína do concreto por esmagamento ou fendilhamento.

Figura 7 - Comportamento do conector *stud bolt*.



Fonte: Fakury (2016).

Considerando esses dois estados limites últimos, a força horizontal resistente de cálculo de um conector é determinada pela Equação (4).

$$Q_{Rd} = \frac{\{R_g \cdot R_p \cdot A_{cs} \cdot f_{ucs} / \gamma_{cs}\}}{\{A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c} / 2 \cdot \gamma_{cs}\}} \quad (4)$$

onde R_g é um coeficiente tabelado de ajuste para efeito de atuação de grupos de conectores, R_p é um coeficiente tabelado para consideração da posição do conector, A_{cs} é a área da seção transversal do fuste do conector, f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector, γ_{cs} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector igual a 1,25, f_{ck} é a resistência característica do concreto e E_c é o módulo de elasticidade do concreto.

Analisando a equação, percebe-se que a resistência depende apenas das características do material do conector e do concreto. O primeiro valor dessa condição se refere à ruptura do conector por tração, e o segundo valor se refere a ruína do concreto por esmagamento ou fendilhamento.

Além do *stud bolt*, outro conector que se encontra normatizado é o perfil U laminado ou formado a frio. Segundo a NBR ABNT 8800:2008, a altura de sua seção transversal deve ser pelo menos 75 mm. São utilizados exclusivamente em vigas mistas com lajes maciças e devem ser instalados com uma das mesas apoiada sobre o perfil de aço, e o plano da alma perpendicular ao eixo longitudinal desse perfil. O comportamento do conector em perfil U é semelhante ao *stud bolt*, pois resiste ao deslizamento relativo entre os materiais e, por meio de sua mesa superior, também resiste ao descolamento vertical. Sua resistência é determinada pela Equação (5).

$$Q_{Rd} = \frac{0,3 \cdot (t_{fcs} + 0,5 \cdot t_{wcs}) \cdot L_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (5)$$

onde t_{fcs} é a espessura média das mesas, t_{wcs} é a espessura da alma e L_{cs} é o comprimento do conector.

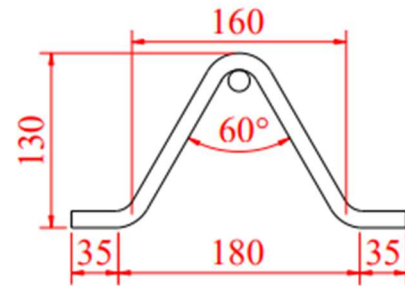
Com as vantagens oferecidas pelas vigas mistas e a crescente demanda por inovações na construção civil para atender as expectativas de viabilidade econômica, estão sendo realizadas diversas pesquisas com o objetivo de desenvolver conectores de cisalhamento alternativos que possam resistir tanto quanto os conectores normalizados, além de serem economicamente viáveis para fabricação e execução.

Para avaliar o desempenho desses conectores alternativos, é realizado um ensaio chamado *push out*, normatizado pelo Eurocódigo 4. Projeto de estruturas mistas de aço e concreto, regras gerais e regras para edifícios (EN 1994-1-1:2004). De acordo com Lima (2021), o modelo de ensaio consiste em duas lajes de concreto armado com dimensões padronizadas, conectadas a um perfil de aço por meio dos conectores de cisalhamento a serem avaliados. Durante o ensaio, um carregamento é aplicado na parte superior do perfil até que ocorra o colapso dos conectores, sendo registrado o deslizamento longitudinal entre o perfil e a laje. Ao final do ensaio, um conjunto de dados é adquirido para análise.

Existem diversos conectores alternativos em estudo, incluindo o *perfobond*, que consiste em chapas de aço com furos imersas em um elemento de concreto. Os pesquisadores Tahir, Tan e Aghlara (2019), desenvolveram três conectores alternativos, são eles conector de cisalhamento de colchete simples (SBSC), conector de cisalhamento de colchete duplo (DBSC), conector de cisalhamento de placa laminada a quente (HPSC). Além disso, há também o conector aparafusado de alta resistência que consiste em parafusos desmontáveis e reutilizáveis.

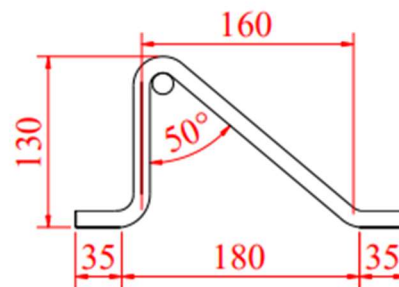
Entre esses conectores alternativos, destaca-se o conector treliçado, objeto de estudo deste trabalho. Desenvolvido por Barbosa (2016), foi fabricado com vergalhões de aço CA-50 dobrados em formato triangular isósceles, como pode ser observado na Figura 8 e formato triangular reto (Figura 9). Segundo Lima (2021), esse conector apresenta diversas vantagens em relação ao *stud bolt*, como baixo custo da matéria-prima, alta capacidade resistente, facilidade de fabricação e independência de equipamentos específicos para instalação.

Figura 8 - Geometria do conector treliçado isósceles.



Fonte: Barbosa (2016).

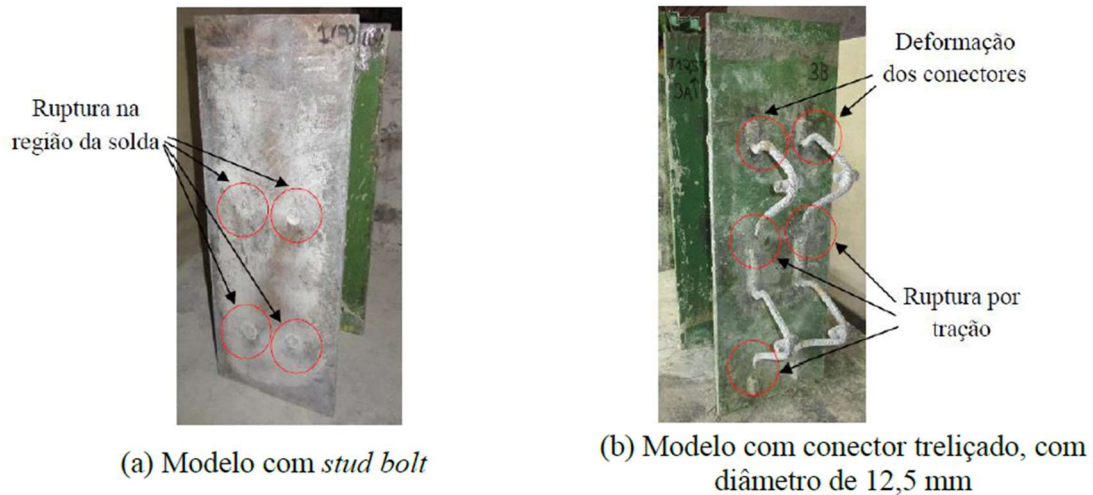
Figura 9: Geometria do conector treliçado reto.



Fonte: Barbosa (2016).

De acordo com Barbosa (2016), no ensaio *push out*, o conector de cisalhamento treliçado é se caracteriza pelo rompimento da haste submetida a tração, ocorrendo na região inferior do conector, enquanto a ligação por solda entre os conectores treliçados e o perfil de aço permanece intacta. Isso difere do ensaio realizado com conector *stud bolt*, como mostrado na Figura 10. Conforme Lima (2021), a haste do conector treliçado submetida à compressão mantém a união entre as lajes e o perfil de aço após ruptura, o que difere dos modelos com conectores *stud bolt*, onde houve destacamento das lajes. Isso proporciona maior segurança nas estruturas mistas com conectores treliçados, pois mesmo após a ruptura da peça, o mesmo não permite a separação total dos componentes.

Figura 10 - Modelos experimentais após os ensaios de push out.



Fonte: Barbosa (2016).

No seu estudo paramétrico, Lima (2021) analisou a variação da altura e do ângulo de abertura das hastes do conector para avaliar o impacto na resistência e no modo de ruptura. O autor concluiu que uma boa geometria seria com $h = 90 \text{ mm}$ e $\alpha_a = 80^\circ$, pois ao alterar a altura, a resistência não apresentou grandes diferenças. Assim, foi adotada uma altura menor que 130 mm para permitir a aplicação em lajes com espessuras menores. Ao variar os ângulos, verificou-se que o conector treliçado com ângulo de 80° apresentou maior capacidade resistente em comparação com os demais.

Para quantificar a capacidade resistente do conector treliçado com altura de 90 mm e ângulo de 80° , Lima (2021) desenvolveu uma equação por meio de regressão não-linear, utilizando o software SPSS statistical v-24.0. Os dados aplicados na regressão foram provenientes das simulações numéricas realizadas pelo autor, resultando na Equação (6).

$$Q_{CT} = 0,695 \cdot A_{CT} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot E_0} \quad (6)$$

onde Q_{CT} é a capacidade resistente do conector treliçado, A_{CT} é a soma das áreas da seção transversal das duas hastes do conector treliçado, f_{cm} é a resistência à compressão do concreto e E_0 é o módulo de elasticidade secante do concreto. Assim como na equação do *stud bolt*, a Equação (6) depende das características do material do conector e do concreto.

2.4. Dimensionamento de vigas mistas de aço-concreto ao momento fletor de acordo com NBR 8800:2008

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, a resistência à flexão das vigas de aço pode ser afetada pela flambagem global ou lateral, em que a viga perde o equilíbrio no plano principal de flexão e começa a apresentar deslocamentos laterais e rotação de torção. Além disso, a flambagem local, que consiste na perda de estabilidade das chapas comprimidas dos componentes do perfil, também pode reduzir o momento resistente da seção.

No entanto, de acordo com Fakury (2016), como a mesa superior do perfil de aço está unida continuamente com a laje pelos conectores, a flambagem lateral com torção não pode ocorrer. O autor também afirma que, embora a mesa superior esteja sendo comprimida, sua flambagem local (FLM) não representa um estado-limite último, uma vez que o principal elemento de resistência às tensões de compressão é a laje de concreto. Portanto, nas vigas mistas, o estado-limite último para o momento fletor está associado apenas à flambagem local da alma (FLA).

Fakury (2016) também afirma que a ocorrência da flambagem local da alma do perfil de aço da viga mista depende da seguinte relação:

$$\frac{h}{tw} \leq 3,76 \cdot \sqrt{\frac{Ea}{fy}} \quad (7)$$

Se a inequação acima for atendida, o perfil de aço é considerado com seção compacta, ou seja, não ocorre flambagem local na alma, e o limitante para o colapso da viga mista se dá pela plastificação total da seção transversal, onde o momento fletor é máximo.

Outro fator relevante para o dimensionamento da viga mista é determinar se a execução das vigas será escorada ou não durante a fase de concretagem. De acordo com Fakury (2009), como o sistema misto só se manifesta após a cura do concreto, se a construção não for escorada, os perfis de aço isolados devem possuir resistência adequada para suportar todas as ações que surgem antes da cura do concreto, sendo necessário verificar se os perfis sofrerão flambagem lateral e flambagem local. Caso a construção seja escorada, o perfil não irá trabalhar isoladamente em nenhum momento, podendo dispensar as verificações citadas anteriormente.

No dimensionamento de uma viga mista de aço-concreto para o momento fletor, é necessário atender a seguinte condição:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (8)$$

onde M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo e M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo. O momento solicitante é obtido a partir da combinação de ações que considera as cargas

permanentes (peso próprio da estrutura e elementos) e cargas acidentais (uso e ocupação). Já o momento resistente é igual ao momento de plastificação, ou seja, o momento máximo em que a estrutura resiste antes de colapsar.

Como mencionado anteriormente, a viga mista pode ter grau de interação total ou parcial, e a determinação do momento resistente difere para cada tipo de interação. Para o caso em que a seção do perfil é compacta e o grau de interação entre os elementos é total, ou seja

$$\alpha \geq 1 \quad (9)$$

a máxima força de compressão que pode atuar na laje de concreto é dada por:

$$C_{cd} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c \quad (10)$$

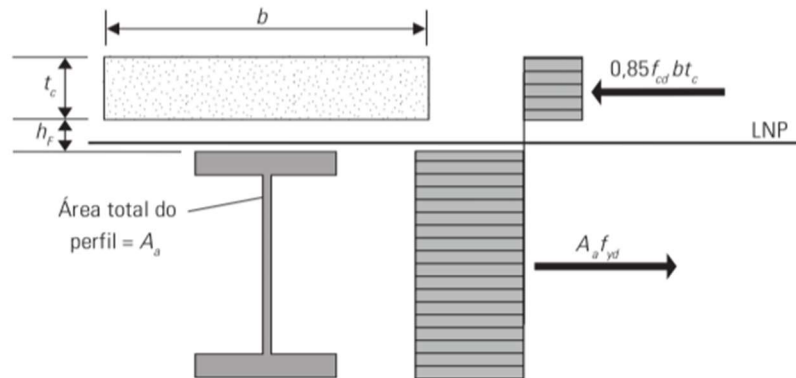
onde C_{cd} é a resultante de compressão do concreto de cálculo. E a força máxima de tração que pode atuar no perfil de aço é representada por:

$$T_{ad} = A_a \cdot f_{yd} \quad (11)$$

onde T_{ad} é a resultante de tração do aço de cálculo.

Se C_{cd} for igual a T_{ad} , a linha neutra plástica (LNP) se situa na interface entre os dois materiais, como ilustra a Figura 11. Nesse caso, a laje de concreto trabalha totalmente a compressão e o perfil trabalha totalmente a tração, ou seja, tem-se uma situação ideal.

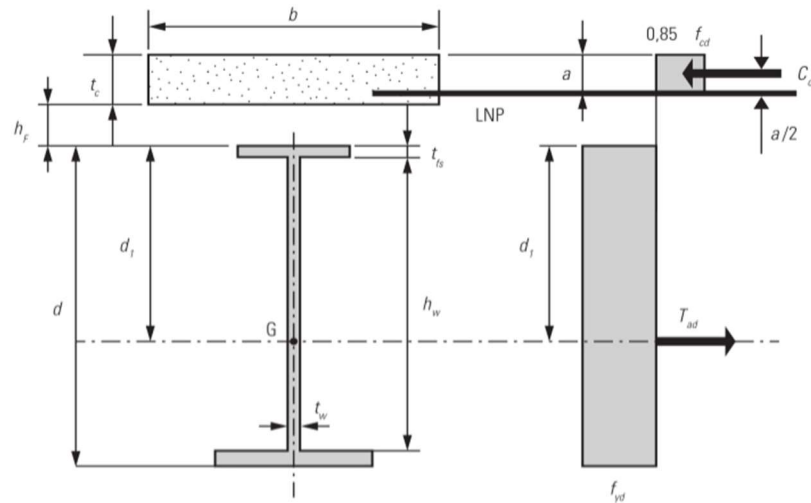
Figura 11 - LNP na interface da viga mista.



Fonte: Fakury (2016).

Se C_{cd} for maior que T_{ad} , tem-se que a linha neutra plástica passa pela laje de concreto, como ilustra a Figura 12. Nesse caso, para que haja equilíbrio entre as forças finais de compressão e tração, parte da laje não pode trabalhar à compressão e, portanto, a resistência à tração do concreto é desprezada.

Figura 12 - LNP na laje da viga mista.



Fonte: Fakury (2016).

Para determinar a resultante de compressão e tração utiliza-se as Equações (12) e (13), respectivamente:

$$C_{cd} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot a \quad (12)$$

$$T_{ad} = A_a \cdot f_{yd} \quad (13)$$

onde a é a espessura da laje. A espessura da laje que está sendo comprimida é obtida pela igualdade das resultantes C_{cd} e T_{ad} , por meio da Equação (14):

$$a = \frac{T_{ad}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b} \quad (14)$$

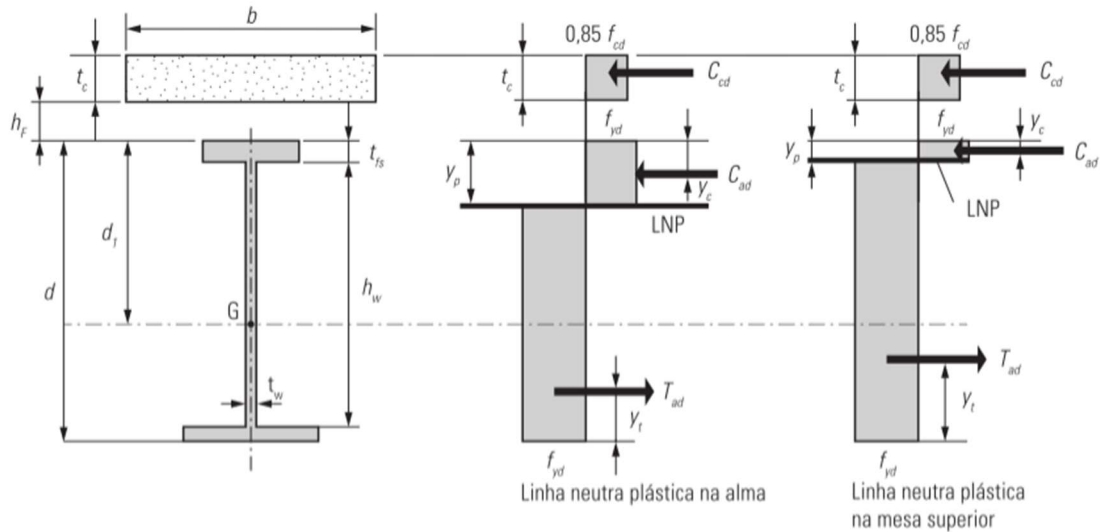
O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd} = T_{ad} \left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2} \right) \quad (15)$$

onde d_1 é a distância do centro geométrico do perfil de aço até sua face superior, h_F é a altura da fôrma de aço quando usa-se laje mista, em caso de laje maciça faz-se h_F igual a zero.

No caso em que T_{ad} for maior que C_{cd} , a linha neutra plástica passa pelo perfil de aço (mesa ou alma), como ilustra a Figura 13. Nesse caso parte do perfil precisa estar sob compressão para que ocorra o equilíbrio entre as forças finais de compressão e tração, surgindo, com isso, a resultante de compressão do aço (C_{ad}).

Figura 13 - LNP no perfil de aço.



Fonte: Fakury (2016).

Igualando as forças de tração com as forças de compressão, tem-se o seguinte:

$$A_a f_{yd} - C_{ad} = C_{ad} + C_{cd} \quad (16)$$

Com isso, a resultante de compressão do aço é dada por:

$$C_{ad} = \frac{1}{2}(A_a \cdot f_{yd} - C_{cd}) \quad (17)$$

Para determinar a posição da linha neutra plástica, é necessário verificar as seguintes relações:

Se $C_{ad} \leq A_{fs} \cdot f_{yd}$, então a linha neutra plástica passa pela mesa do perfil de aço e sua posição, medida a partir do topo do perfil, é dada por:

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{fs} \cdot f_{yd}} \cdot t_{fs} \quad (18)$$

onde A_{fs} é a área de aço da mesa superior do perfil e t_{fs} é a espessura da mesa.

Se $C_{ad} > A_{fs} \cdot f_{yd}$, então a linha neutra plástica passa pela alma do perfil de aço e sua posição, medida a partir do topo do perfil, é dada por:

$$y_p = t_{fs} + h_w \cdot \left(\frac{C_{ad} - A_{fs} \cdot f_{yd}}{(h_w \cdot t_w) \cdot f_{yd}} \right) \quad (19)$$

onde h_w é a distância entre as faces internas da mesa do perfil. E o momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd} = C_{ad} \cdot (d - y_t - y_c) + C_{cd} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t \right) \quad (20)$$

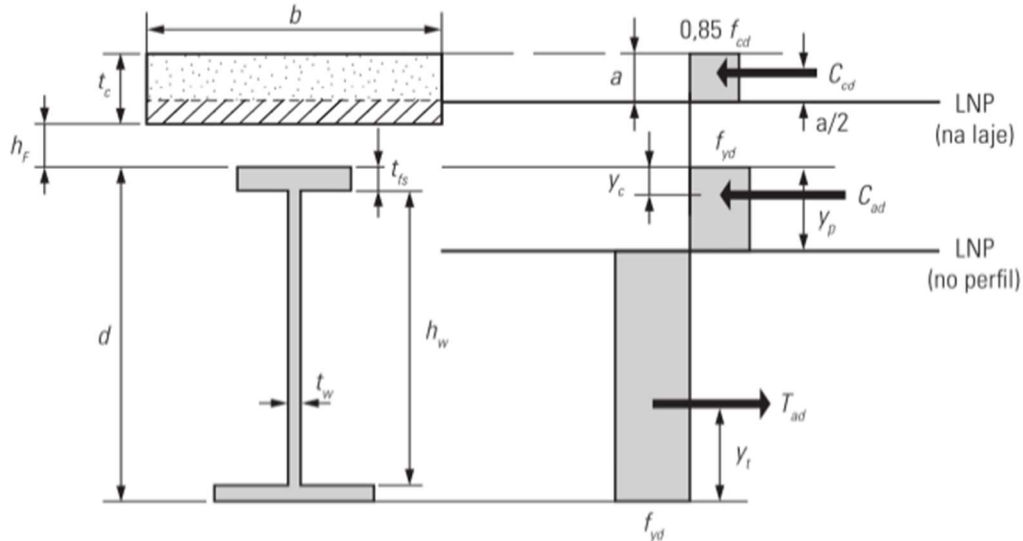
onde d é a altura total do perfil, y_t é a distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até sua face inferior e y_c é a distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até sua face superior.

No caso em que a seção do perfil é compacta e o grau de interação entre os elementos é parcial, ou seja,

$$\alpha_{min} \leq \alpha < 1 \quad (21)$$

existem duas linhas neutras plásticas (uma passando na laje e outra passando pela mesa ou alma do perfil), diferentemente do caso anterior em que só há uma linha neutra. Levando em consideração que o concreto tem baixa resistência à tração, a contribuição da região da laje que se encontra tracionada é desprezada, como ilustra a Figura 14.

Figura 14 - LNP na laje e no perfil da viga.



Fonte: Fakury (2016).

A força de compressão que atua na região comprimida da laje, por equilíbrio, iguala-se à força máxima horizontal que é transmitida pelos conectores de cisalhamento utilizados entre as seções de momento nulo e a seção de momento máximo. Com isso, tem-se que pela Equação (2)

$$C_{cd} = n \cdot Q_{Rd} = \alpha \cdot F_{hd}$$

Do equilíbrio de forças, obtém-se as resultantes das regiões comprimida (C_{ad}) e tracionada (T_{ad}) do perfil de aço conforme no caso anterior. A espessura da laje comprimida é dada por:

$$a = \frac{C_{cd}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b} \quad (22)$$

Se $C_{ad} \leq A_{fs} \cdot f_{yd}$, então a linha neutra plástica passa pela mesa do perfil de aço e sua posição, medida a partir do topo do perfil é dada por:

$$y_P = \frac{C_{ad}}{A_{fs} \cdot f_{yd}} \cdot t_{fs} \quad (23)$$

Se $C_{ad} > A_{fs} \cdot f_{yd}$, então a linha neutra plástica passa pela alma do perfil de aço e sua posição medida a partir do topo do perfil, é dada por:

$$y_P = t_{fs} + h_w \left(\frac{C_{ad} - A_{fs} \cdot f_{yd}}{(h_w \cdot t_w) \cdot f_{yd}} \right) \quad (24)$$

E o momento fletor resistente é dado pela seguinte expressão:

$$M_{Rd} = C_{ad} \cdot (d - y_t - y_c) + C_{cd} \cdot \left(t_c - \frac{a}{2} + h_F + d - y_t \right) \quad (25)$$

Após determinar o momento resistente e a resistência do conector, deve-se portanto, calcular o número de conectores que necessitam para que os elementos (perfil de aço e laje de concreto) trabalhem em conjunto e conseqüentemente resistam aos esforços. Dito isso, a ABNT NBR 8800:2008, fornece uma equação para o cálculo do grau de interação, abordado anteriormente, dado pela Equação (2):

$$\alpha = \frac{n \cdot Q_{Rd}}{F_{hd}}$$

Rearranjando essa equação, tem-se que

$$n = \frac{\alpha \cdot F_{hd}}{Q_{Rd}} \quad (26)$$

A Equação (26) demonstra que o número de conectores necessários varia de acordo com o grau de interação da peça. Em casos de interação total, é necessário um maior número de conectores, enquanto em casos de conexão parcial, o número de conectores é reduzido, o que contribui para a redução do custo, conforme já mencionado anteriormente.

Quanto ao detalhamento, a ABNT NBR 8800:2008 estabelece que o espaçamento máximo entre linhas de centro na direção do eixo longitudinal da viga deve ser de 8 vezes a altura total da laje (t_c para laje maciça e t_c mais h_F para laje mista e laje com pré-laje pré-moldada de concreto). O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores na direção do eixo longitudinal da viga deve ser de 6 vezes o diâmetro do conector ao longo do vão da viga, podendo ser reduzido para 4 vezes o diâmetro no caso da laje mista. Já o espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores na direção transversal ao vão da viga deve ser de 4 vezes o diâmetro do conector.

2.5. Verificação das vigas mistas de aço-concreto a força cortante de acordo com NBR 8800:2008

De acordo com a norma, no dimensionamento das vigas mistas à força cortante, deve-se atender ao seguinte:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (27)$$

onde V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo, obtida através da combinação de ações e V_{Rd} é a força cortante resistente de cálculo. No caso de vigas mistas a norma despreza a contribuição da laje de concreto, ou seja, a força cortante resistente é obtida considerando apenas o perfil de aço trabalhando.

Segundo a NBR 8800:2008, faz-se necessário calcular o parâmetro de esbeltez da alma do perfil, a fim de verificar a ocorrência de flambagem local na alma por cisalhamento, segue a equação:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (28)$$

onde λ é índice de esbeltez da alma. O valor máximo que o parâmetro de esbeltez pode chegar para que não ocorra flambagem por cisalhamento é λ_p que é dado por:

$$\lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E_a}{f_y}} \quad (29)$$

onde k_v é um coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento, que depende da relação entre a distância dos enrijecedores transversais (a), ou seja,

$$k_v = 5,0 \rightarrow \text{para almas sem enrijecedores transversais, para } \frac{a}{h} > 3, \text{ ou } \frac{a}{h} > \left(\frac{260}{h/t_w}\right)^2$$

ou

$$k_v = 5,0 + \frac{5}{(a/h)^2}, \text{ para todos os outros casos.}$$

Nesse caso, se $\lambda \leq \lambda_p$, então V_{Rk} (Força cortante resistente característica) é dada por:

$$V_{Rk} = (0,60 \cdot A_w \cdot f_y) \quad (30)$$

onde A_w é área efetiva de cisalhamento e é dada por:

$$A_w = d \cdot t_w \quad (31)$$

onde d é a altura total da seção transversal. Vale ressaltar que há outros casos, em que $\lambda > \lambda_p$, porém como é considerado o perfil com seção compacta, a flambagem local na alma não ocorre, logo os outros casos são irrelevantes para este trabalho. Por fim, tem-se que

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{\lambda_{a1}} \quad (32)$$

onde λ_{aI} é o coeficiente de segurança do concreto, igual a 1,4.

2.6. Verificação ao estado limite de serviço

No estado limite de serviço foi analisada apenas as flechas. De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, considerando L_e igual ao vão da viga, as flechas admissíveis que as vigas mistas de cobertura e de piso devem atingir são: $L_e/250$ e $L_e/350$, respectivamente. No cálculo da flecha, deve-se usar, simplificadaamente, a combinação rara de ações de serviço.

Nas vigas escoradas, a determinação da flecha máxima é dada por:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \delta_{p,ld} + \delta_{v,ld} \quad (33)$$

onde $\delta_{p,ld}$ é a flecha da seção mista causada pelas ações permanentes e $\delta_{v,ld}$ é a flecha da seção mista causada pelas ações variáveis.

Para calcular os deslocamentos, deve ser considerado o momento de inércia efetivo dado por:

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\alpha} \cdot (I_{tr} - I_a) \quad (34)$$

onde I_a é o momento de inércia da seção do perfil de aço e possui valor tabelado de acordo com o tipo de perfil, I_{tr} é o momento de inércia da seção mista homogeneizada, dado pela seguinte equação:

$$I_{tr} = I_a + A_a \cdot (y_{tr} - y_a)^2 + \frac{b_{tr} \cdot t_c^3}{12} + A_{c,tr} \cdot \left(d + h_f + \frac{t_c}{2} - y_{tr} \right)^2 \quad (35)$$

onde y_{tr} é dado por:

$$y_{tr} = \frac{A_a \cdot y_{a,i} + b_{tr} \cdot t_c \cdot \left(d + h_f + \frac{t_c}{2} \right)}{A_a + b_{tr} \cdot t_c} > d + h_f \quad (36)$$

Se $y_{tr} > d + h_f$ indica que a linha neutra elástica está na laje de concreto, caso contrário está no perfil de aço.

$$b_{tr} = \frac{b}{\alpha_e} \quad (37)$$

$$\alpha_e = 3 \cdot \frac{E_a}{E_c} \quad (38)$$

$$A_{c,tr} = b_{tr} \cdot t_c \text{ (usa-se } t_c \text{ quando } y_{tr} < d + h_f \text{, caso contrário usa-se } a \text{).}$$

Em que

$$a = d + h_f + t_c - y_{tr} \quad (39)$$

$$(W_{tr})_{i,ld} = \frac{I_{tr}}{y_{tr}} \quad (40)$$

$$(W_{tr})_{i,ef,ld} = W_{a,i} + \sqrt{\alpha} \cdot [(W_{tr})_i - W_{a,i}] \quad (41)$$

onde $W_{a,i}$ é o módulo de flexão e é tabelado de acordo com o tipo de perfil.

Para aplicação da análise elástica no cálculo da flecha, é necessário que a seguinte condição seja atendida:

$$\frac{M_{Ga,Sk}}{W_{a,i}} + \frac{M_{La,Sk}}{W_{ef,i}} \leq f_y \quad (42)$$

$$M_{Ga,Sk} = \frac{q_{Ga,k} \cdot L_e^2}{8} \quad (43)$$

$$M_{L,Sk} = \frac{q_{L,k} \cdot L_e^2}{8} \quad (44)$$

Em seguida, calcula-se as flechas a partir das seguintes equações:

$$\delta_{p,ld} = \frac{5 \cdot q_{p,ld} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{ef,ld}} \quad (45)$$

$$\delta_{v,ld} = \frac{5 \cdot q_{v,ld} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{ef,ld}} \quad (46)$$

Por fim, compara-se o valor de flecha máxima obtido pela Equação (33) com a flecha admissível dada pela norma.

2.7. Levantamento de custos

Conforme Cavalcante (2020), a análise da viabilidade econômica de uma construção é realizada durante a fase de orçamentação da obra, permitindo uma estimativa eficaz dos custos diretos e indiretos, bem como do lucro potencial a ser obtido. De acordo com a Caixa (2020), a definição de orçamento é a identificação, descrição, quantificação, análise e valoração de mão de obra, equipamentos, materiais, custos financeiros, impostos, riscos e margem de lucro desejada, visando prever de forma adequada o preço final do empreendimento.

Nesse contexto, Cavalcante (2020) apud Tisaka (2006), destaca que o processo de orçamentação tem início com o levantamento dos quantitativos físicos dos projetos e a elaboração da composição de custos unitários para execução de cada serviço, levando em consideração as leis sociais, os encargos trabalhistas e outros custos relacionados a determinado serviço. De acordo com Cavalcante (2020), as composições podem ser obtidas através da observação e mensuração in loco da produtividade de operários e máquinas relacionadas ao consumo de materiais durante a execução dos serviços.

Com base nisso, encontram-se disponíveis algumas planilhas que oferecem composições de serviços realizados na construção civil, as quais podem ser consultadas para a elaboração do orçamento da obra. Segundo o documento fornecido pelo Tribunal de Contas da União (Orientações para elaboração de planilhas orçamentárias de obras públicas, 2014),

diversos sistemas referenciais de preços são mantidos por órgãos/entidades estaduais e municipais. No estado do Ceará, por exemplo, tem-se o SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) e a SEINFRA (Secretaria de Infraestrutura).

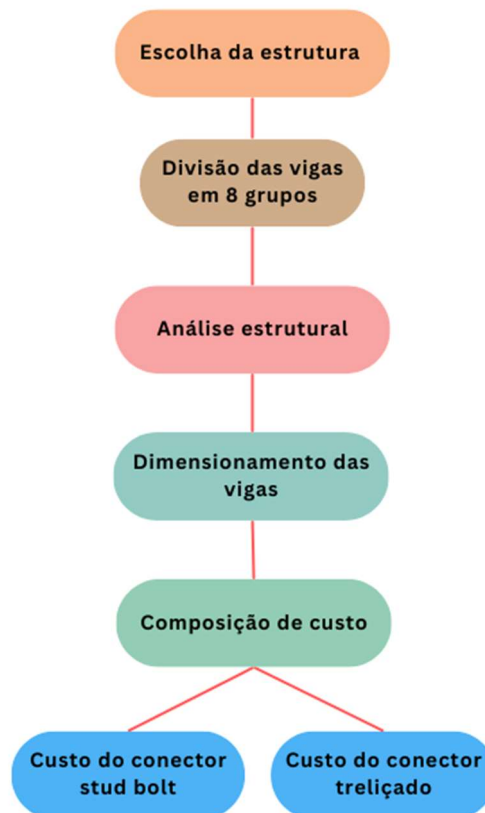
De acordo com a Caixa (2014), o SINAPI foi implementado em 1969 pelo Banco Nacional de Habitação (BNH), em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Inicialmente, foi criado para fornecer informações sobre custos e índices da construção civil habitacional, e somente em 1986 o SINAPI foi adotado pela Caixa, após a extinção do BNH. Desde então, tornou-se um sistema corporativo utilizado como referência de custos e índices para obras habitacionais no Brasil.

A Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA) informa que a tabela unificada SEINFRA foi implantada em 2001, pela Portaria N°.170/SEINFRA, como resultado de um trabalho de uniformização e padronização dos custos unitários de serviços de engenharia relacionados a obras de edificação, saneamento, rodovias, portos e ferrovias no âmbito do Estado do Ceará.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu em realizar o dimensionamento e posteriormente um estudo comparativo de custos entre o conector *stud bolt* e um conector alternativo baseado no modelo de Lima (2021). Na figura 15 encontra-se um fluxograma resumindo a organização do presente trabalho.

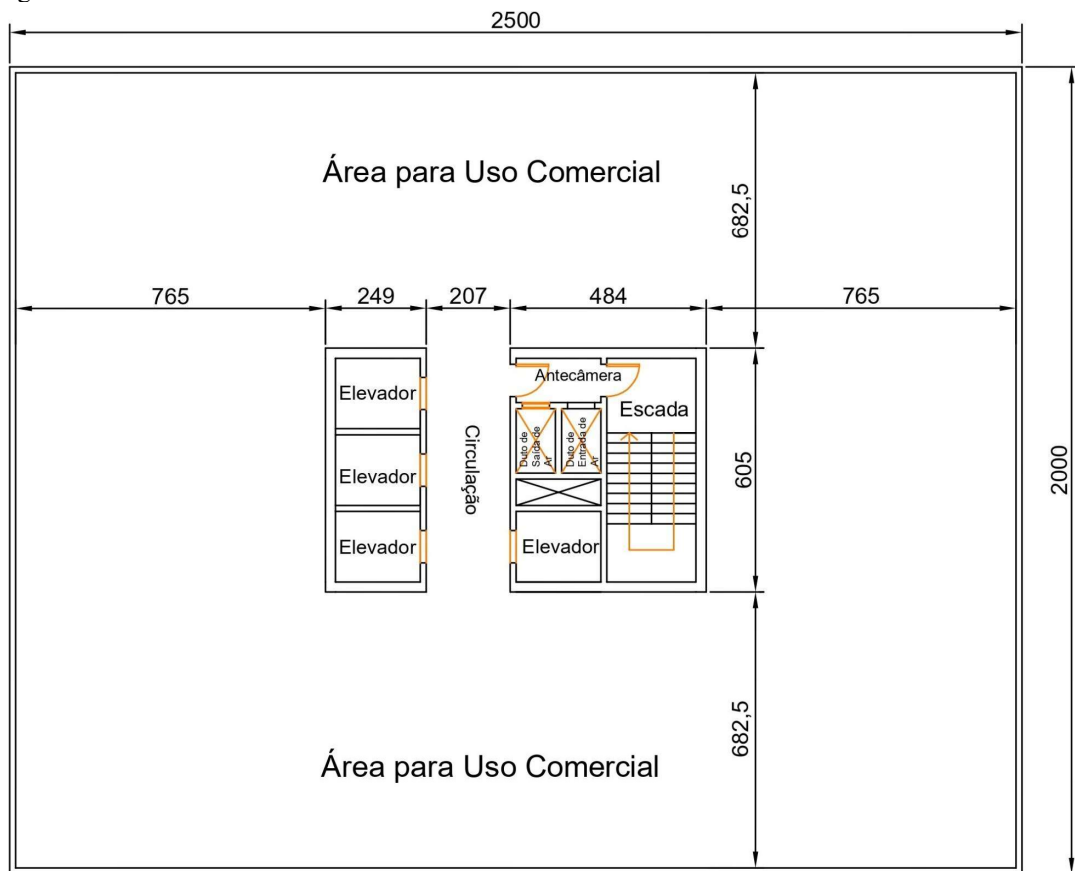
Figura 15 – Fluxograma da organização do trabalho



Fonte: Autoria própria (2023).

Inicialmente foi definida a estrutura a ser utilizada para o dimensionamento e análise de custos, a qual foi um pavimento tipo de um edifício comercial. Esta estrutura foi adaptada a partir do estudo de Carini (2014), considerando uma laje maciça com espessura de 14 cm, em vez de *steel deck*, e apenas as vigas mistas, pois na região dos elevadores e escada há apenas vigas metálicas. A Figura 16 ilustra a planta arquitetônica da estrutura.

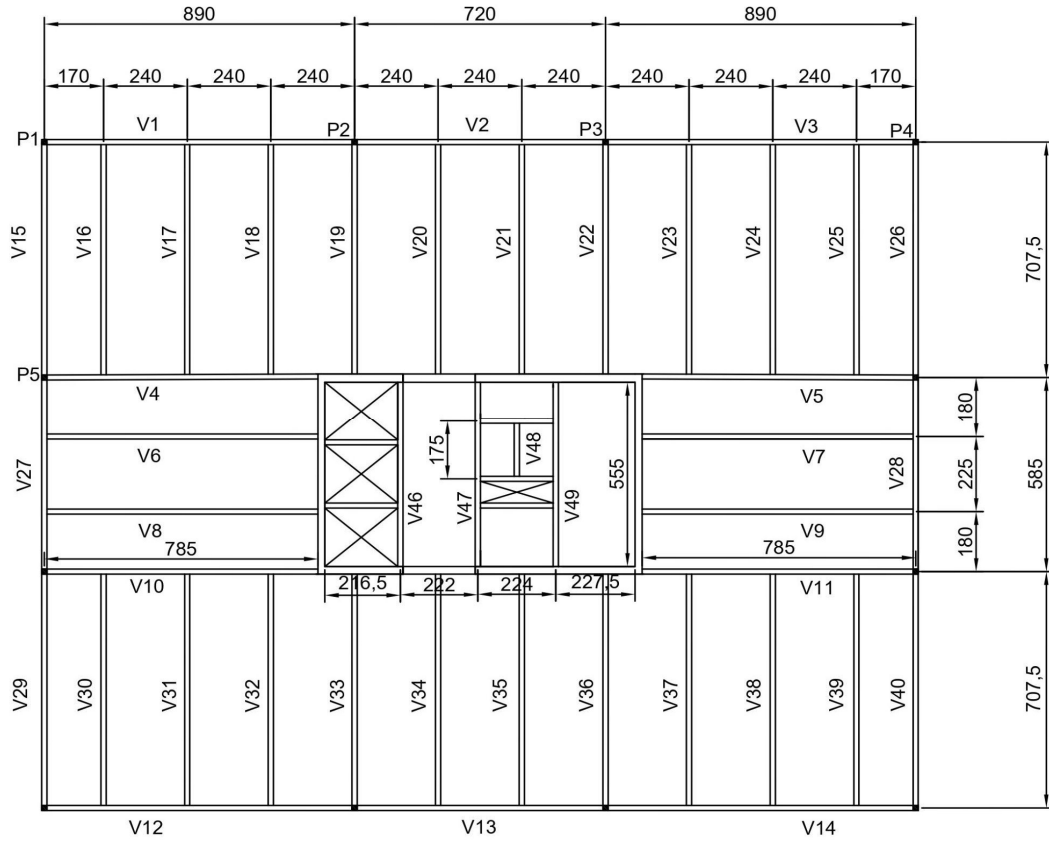
Figura 16 - Planta baixa da estrutura.



Fonte: Adaptado de Carini (2014).

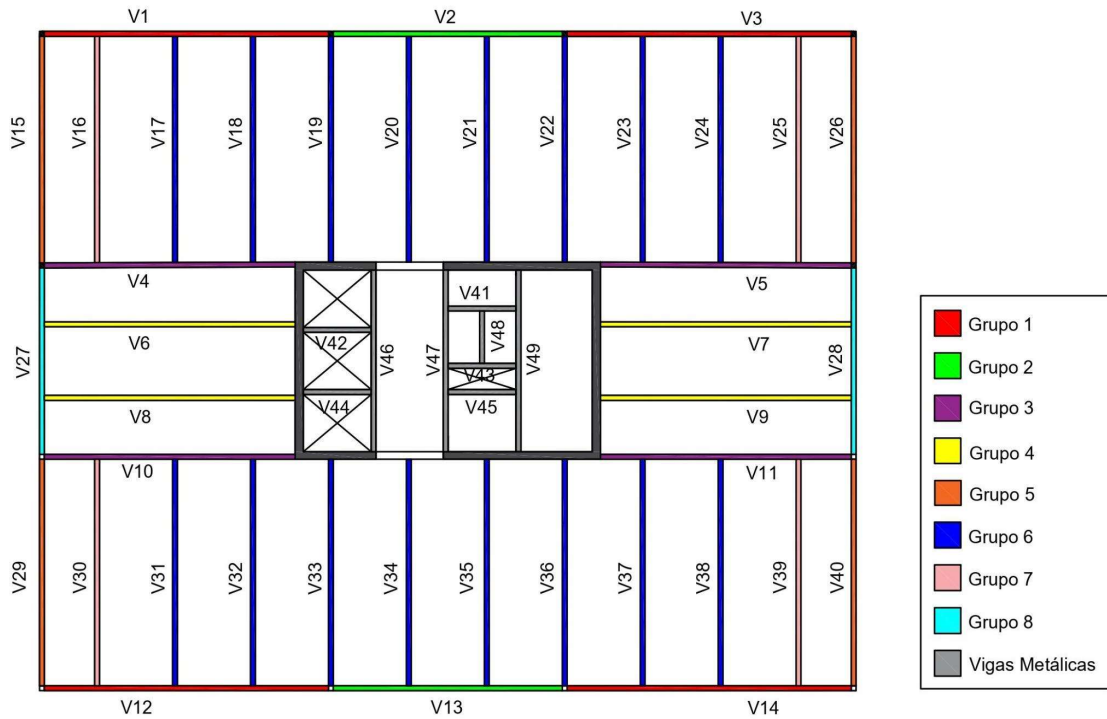
A concepção estrutural adotada foi a mesma de Carini (2014), e para simplificar os processos de dimensionamento e detalhamento, foram criados oito agrupamentos de vigas, considerando que algumas tinham o mesmo perfil metálico, vão e largura colaborante da laje. A Figura 17 mostra o lançamento de todas as vigas da estrutura, enquanto a Figura 18 mostra a divisão dos grupos e cada cor representando um grupo.

Figura 17 - Lançamento das vigas.



Fonte: Adaptado de Carini (2014).

Figura 18 - Divisão dos grupos de vigas.



Fonte: Adaptado de Carini (2014).

Os perfis utilizados são formados por aço ASTM A572 – Grau 50, tendo como resistência de escoamento (f_y) igual a 345 MPa e resistência última (f_u) igual a 450 MPa. A Tabela 1 apresenta a divisão dos grupos, o vão e o perfil metálico adotado em cada um.

Tabela 1 - Divisão dos grupos de vigas e suas características.

Grupos	Vigas	Vão (cm)	Perfil
1	V1; V3; V12; V14	890	W410 x 53
2	V2; V13	720	W360 x 39
3	V4; V5; V10; V11	785	W410 x 53
4	V6; V7; V8; V9	707,5	W310 x 23,8
5	V15; V26; V29; V40	707,5	W310 x 23,8
6	V17; V18; V19; V20; V21; V22; V23; V24; V31; V32; V33; V34; V35; V36; V37; V38	707,5	W310 x 23,8
7	V16; V25; V30; V39	707,5	W310 x 23,8
8	V27; V28	585	W360 x 39

Fonte: Autoria própria (2023).

Antes de proceder ao dimensionamento, é crucial realizar a análise estrutural, a qual foi conduzida para uma viga de cada grupo, uma vez que as vigas de um mesmo grupo possuem características idênticas. Para determinar as solicitações, é essencial determinar as cargas atuantes na estrutura, sendo que:

Ações permanentes atuando no pavimento tipo:

- Camada de regularização e assentamento de piso: 5 cm de espessura; carga de 1,20 kN/m²;
- Revestimento em granito: 2 cm de espessura; carga de 0,56 kN/m²;
- Forro em gesso: 2 cm de espessura; carga de 0,25 kN/m²;
- Paredes de vedação da fachada: peso próprio igual a 0,72 kN/m², multiplicando o peso próprio pela altura da parede igual a 3,30 m tem-se uma carga total de 2,40 kN/m de alvenaria.

Cargas acidentais atuantes no pavimento tipo:

- Nas áreas de uso comercial: 5,0 kN/m² (levando em conta 1,0 kN/m² devido às divisórias dos estabelecimentos).

Após a determinação das cargas, procedeu-se à combinação de ações para o estado limite último, multiplicando as cargas permanentes pelo fator de segurança 1,4 e as cargas acidentais pelo fator de segurança 1,5. Vale ressaltar que, para calcular os momentos fletores e os esforços cortantes solicitantes, foi utilizado o software Ftool como suporte. Foram consideradas todas as vigas biapoiadas e submetidas a cargas uniformemente distribuídas. Além disso, a resistência característica do concreto (f_{ck}) considerada foi de 30 MPa.

Após a análise estrutural, realizou-se o dimensionamento e detalhamento das vigas mistas através de uma planilha desenvolvida no software Microsoft Office Excel seguindo as formulações fornecidas pela NBR 8800:2008 e pela literatura, conforme mostra Tabela 2. As formulações utilizadas no dimensionamento das vigas mistas foram iguais para ambos os tipos de conectores, diferenciando apenas a equação de resistência.

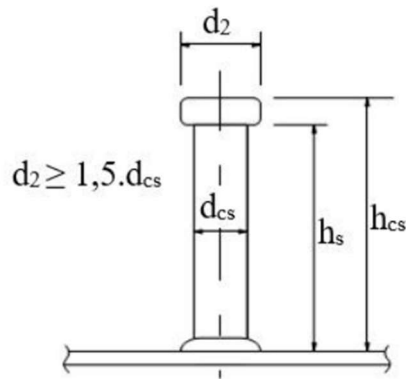
Tabela 2 – Equações utilizadas no dimensionamento.

	Stud bolt	Treliçado
	Grupos 1,2, 3 e 8	Grupos 1,2, 3 e 8
Momento Resistente (kN.m)	$M_{Rd} = C_{ad} \cdot (d - y_t - y_c) + C_{cd} \cdot \left(t_c - \frac{a}{2} + h_F + d - y_t \right)$	$M_{Rd} = C_{ad} \cdot (d - y_t - y_c) + C_{cd} \cdot \left(t_c - \frac{a}{2} + h_F + d - y_t \right)$
	Grupos 4,5,6 e 7	Grupos 4,5,6 e 7
	$M_{Rd} = T_{ad} \left(d_l + h_F + t_c - \frac{a}{2} \right)$	$M_{Rd} = T_{ad} \left(d_l + h_F + t_c - \frac{a}{2} \right)$
Resistência (kN)	$Q_{Rd} = \left\{ \frac{R_g \cdot R_p \cdot A_{cs} \cdot f_{ucs} / \gamma_{cs}}{A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c / 2} \cdot \gamma_{cs}} \right\}$	$Q_{CT} = 0,695 \cdot A_{CT} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot E_0}$
Número conectores	$\alpha = \frac{n \cdot Q_{Rd}}{F_{hd}}$	$\alpha = \frac{n \cdot Q_{Rd}}{F_{hd}}$
Esforço cortante (kN)	$V_{Rd} = (0,60 \cdot A_w \cdot f_y) / \lambda_{a1}$	$V_{Rd} = (0,60 \cdot A_w \cdot f_y) / \lambda_{a1}$
Flechas (cm)	$\delta_{p,ld} = \frac{5 \cdot q_{p,ld} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{ef,ld}}$ $\delta_{v,ld} = \frac{5 \cdot q_{v,ld} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{ef,ld}}$	$\delta_{p,ld} = \frac{5 \cdot q_{p,ld} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{ef,ld}}$ $\delta_{v,ld} = \frac{5 \cdot q_{v,ld} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{ef,ld}}$

Fonte: Autoria própria (2023).

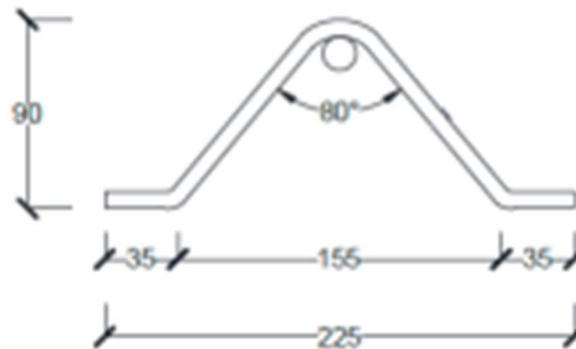
O conector *stud bolt* utilizado no dimensionamento de todas as vigas possui diâmetro (d_{cs}) de 19 mm e altura (h_{cs}) de 80 mm, sua geometria é ilustrada na Figura 19. Já para o conector alternativo, foi utilizado o conector treliçado isósceles, com altura de 90 mm, diâmetro de 12,5 e ângulo de abertura das hastes 80° , sua geometria pode ser observada na Figura 20.

Figura 19: Geometria do conector *stud bolt*.



Fonte: Barbosa (2016).

Figura 20: Geometria do conector treliçado isósceles.



Fonte: Adaptado de Lima (2021).

Através do dimensionamento, foram obtidos os momentos fletores e os esforços cortantes resistentes, a resistência dos conectores *stud bolt* e treliçado, o número de conectores de cada tipo e as flechas, levando em consideração as propriedades geométricas e os materiais dos elementos constituintes das vigas, bem como o grau de interação. Com base nesse dimensionamento, foi possível detalhar a distribuição dos conectores nas vigas.

Por fim, foi elaborada a composição de insumos para um conector *stud bolt* e um treliçado, considerando os materiais, serviços, equipamentos e mão de obra, com base na

planilha de referência de custo (SINAPI) e orçamentos fornecidos por empresas. Posteriormente, foi obtido o custo dos dois tipos de conectores por grupo de vigas e para toda a estrutura, possibilitando a comparação entre eles.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tópicos posteriores serão apresentados os resultados obtidos pelo dimensionamento e pela composição de custos.

4.1. Dimensionamento das vigas mista

No dimensionamento das vigas mistas à flexão analisou-se o número de conectores, verificou-se o esforço cortante e o estado limite de serviço. Por fim, obteve-se o detalhamento das vigas para visualizar distribuição dos conectores. Abaixo serão apresentados cada um desses parâmetros.

4.1.1. Dimensionamento à flexão

Com o dimensionamento realizado, foram determinados os graus de interação para cada grupo e os valores de momento resistente de cálculo (MRd) que foram obtidos através das equações que se encontram na Tabela 2. Os momentos solicitantes de cálculo (MSd) são advindos da análise estrutural. O MRd deve ser maior que o MSd para garantir a capacidade da estrutura resistir aos carregamentos atuantes. A Tabela 3, apresenta o grau de interação, juntamente com os valores de momento solicitante e resistente para cada grupo de vigas considerado.

Tabela 3 - Momento solicitante, resistente e grau de interação

Grupo	MSd (kN.m)	Grau de Interação	MRd (kN.m)
1	564,2	0,56 (Parcial)	565,8
2	338,1	0,7 (Parcial)	397,21
3	548,7	0,6 (Parcial)	594,9
4	239,88	1 (Total)	270,04
5	104,2	1 (Total)	253,38
6	230,55	1 (Total)	267,25
7	197,23	1 (Total)	271,79
8	236,7	0,55 (Parcial)	371,93

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme demonstrado na Tabela 3, alguns grupos foram dimensionados com grau de interação total e outros com grau de interação parcial. Inicialmente, foi considerada a interação total para todos os grupos de vigas. No entanto, ao realizar o detalhamento, para alguns grupos, o espaçamento mínimo não foi obedecido, sendo necessário dimensioná-los considerando interação parcial, o que resultou na redução do número de conectores.

As resistências do conector *stud bolt* (Q_{Rd}) e conector treliçado (Q_{CT}), obtidas pelas Equações (4) e (6), respectivamente, estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Resistências dos conectores de cisalhamento

Q_{Rd} (kN)	Q_{CT} (kN)	Relação entre os conectores (%)
94,13	103,49	9,05

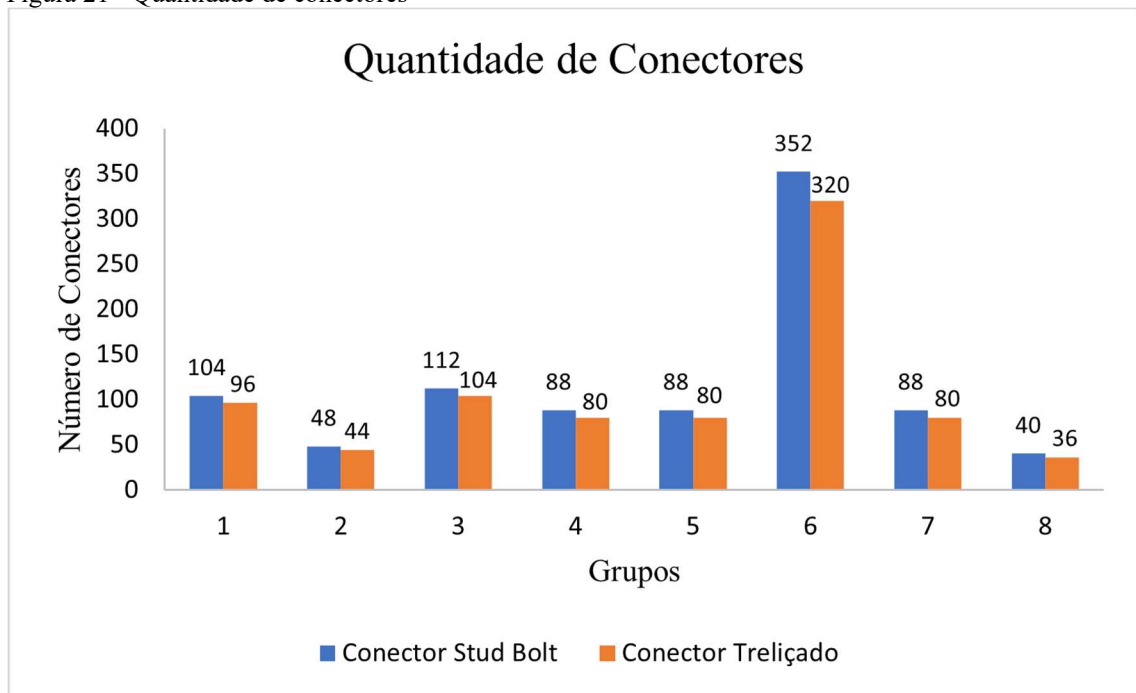
Fonte: Autoria própria (2023).

Para ambos os grupos, obteve-se a mesma resistência, uma vez que as equações dependem apenas das propriedades do conector e do concreto.

O valor da resistência do conector treliçado é superior em comparação com a resistência do conector *stud bolt*, o que está em conformidade com os resultados obtidos pelos ensaios experimentais realizados por Barbosa (2016) e Lima (2021). Em termos percentuais, a resistência do conector treliçado é aproximadamente 10% superior à do conector *stud bolt*.

Com as resistências e o grau de interação obtidos, foi possível determinar o número de conectores dos dois tipos estudados. Esses valores foram inicialmente calculados para cada viga, no trecho entre a seção de momento fletor solicitante máximo e a de momento nulo mais próxima. Posteriormente, devido ao fato de as vigas serem biapoiadas, ou seja, possuírem momento fletor máximo no meio do vão e momento nulo nas extremidades, houve a consideração de dois trechos para o cálculo do número de conectores. Assim, foi possível obter a quantidade de conectores para uma viga de cada grupo e, conseqüentemente, com base no número de vigas de cada grupo, foi calculado o total de conectores necessários. A Figura 21 apresenta as quantidades de conectores *stud bolt* e treliçado obtidas por grupo de viga.

Figura 21 - Quantidade de conectores

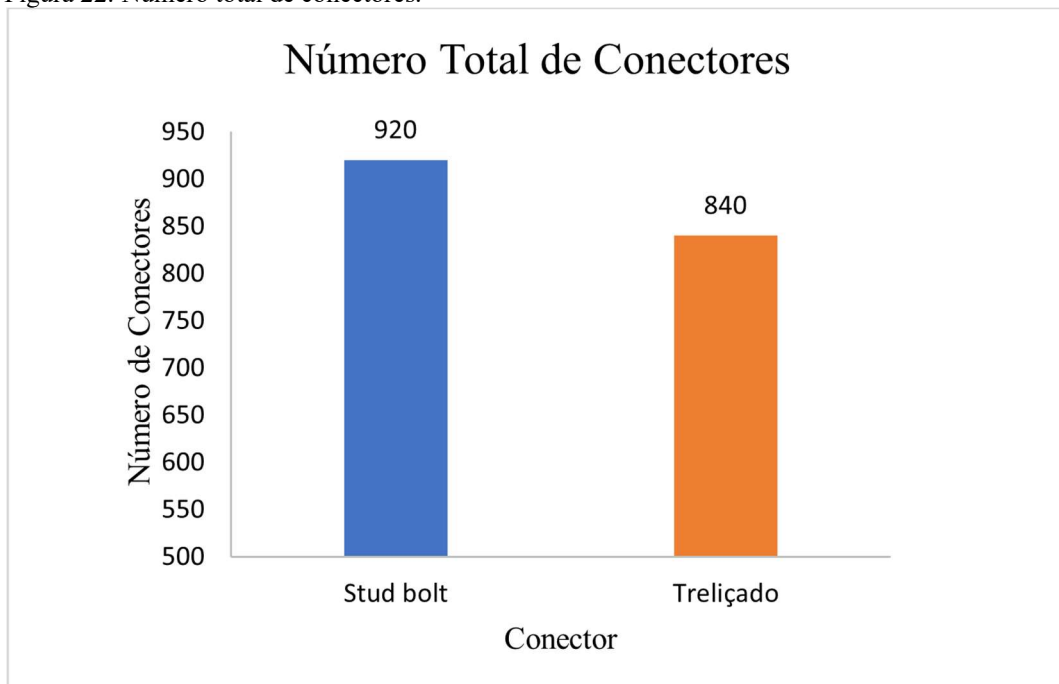


Fonte: Autoria própria (2023).

Observa-se na Figura 21 que, para todos os grupos, o número de conectores *stud bolt* foi superior ao trelçado. Isso significa que é necessário utilizar uma quantidade maior de *stud bolts* para resistir a força horizontal de cisalhamento. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que a resistência do conector trelçado, como mencionado anteriormente, é superior à do conector *stud bolt*, e o cálculo que determina o número de conectores depende dessas resistências.

Com base nesse quantitativo, foi possível determinar o total de conectores necessários para execução das vigas mistas dessa estrutura em estudo, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22: Número total de conectores.



Fonte: Autoria própria (2023).

Fazendo a porcentagem, tem-se aproximadamente 9% de diferença entre o número de conectores.

4.1.2. Verificação do esforço cortante

A partir da análise estrutural realizada, foi possível obter o valor do esforço cortante solicitante de cálculo (VSd). Já o esforço cortante resistente de cálculo (VRd) foi determinado de acordo com a ABNT NBR 8800:2008. É importante ressaltar que, para o cálculo do esforço cortante resistente, considerou-se apenas o perfil de aço, desconsiderando a contribuição do concreto.

Os valores obtidos para o esforço cortante solicitante e resistente estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Esforço cortante solicitante e resistente de cálculo.

(Continua)

Grupos	VSd (kN)	VRd (kN)
1	204,6	537,73
2	144,4	406,1
3	256,8	537,73

Tabela 5 - Esforço cortante solicitante e resistente de cálculo.

(Conclusão)

Grupos	VSd (kN)	VRd (kN)
4	122,23	307,71
5	58,81	307,71
6	130,35	307,71
7	111,51	307,71
8	133,7	406,1

Fonte: Autoria própria (2023).

Analisando a Tabela 5, verifica-se que as resistências foram superiores às solicitações para todos os grupos, demonstrando que as vigas mistas de aço-concreto são capazes de resistir aos esforços cortantes.

4.1.3. Verificação do estado limite de serviço

Na verificação do estado limite de serviço, foram calculadas as flechas ou deslocamentos máximos ($\delta_{\text{máx}}$) que ocorrem no meio da viga para cada grupo. Esses cálculos foram realizados utilizando a Equação (33), considerando a inércia homogeneizada obtida pela Equação (35) e foi utilizada a combinação rara das ações. Os valores obtidos foram então comparados com as flechas admissíveis (δ_{adm}) estabelecidas pela ABNT NBR 8800:2008. É importante ressaltar que as vigas do pavimento dimensionadas são de piso, portanto, o vão da viga foi dividido por 350 para obter as flechas admissíveis. Os resultados das flechas máximas e admissíveis estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de flechas.

(Continua)

Grupos	δ_{adm} (cm)	$\delta_{\text{máx}}$ (cm)
1	2,54	0,84
2	2,06	0,56
3	2,24	0,41
4	2,24	1,09
5	2,02	0,87

Tabela 6 - Resultados de flechas.

(Conclusão)		
Grupos	δ_{adm} (cm)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (cm)
6	2,02	0,73
7	2,02	0,67
8	1,67	0,28

Fonte: Autoria pr3pria (2023).

Comparando os valores apresentados na Tabela 6, constata-se que todas as flechas est3o dentro dos limites permitidos, indicando que n3o haver3 deslocamentos excessivos que comprometam o desempenho da estrutura.

4.1.4. Detalhamento das vigas mistas

Ap3s o dimensionamento, os conectores foram distribuídos em cada viga respeitando os espaçamentos m3nimo e m3ximo exigidos pela ABNT NBR 8800:2008. Com base no requisito de que o espaçamento m3nimo deve ser 6 vezes o di3metro do conector, foram obtidos espaçamentos m3nimos de 11,4 cm para as vigas com *stud bolt* e 7,5 cm para as vigas com conector treliçado. Quanto ao espaçamento m3ximo, este 3 determinado como 8 vezes a espessura da laje, resultando em um valor m3ximo de 112 cm, considerando a espessura de 14 cm da laje.

A Tabela 7 mostra detalhes sobre a distribuiç3o dos conectores em uma viga de cada grupo. Vale salientar que optou-se por um espaçamento entre centro de conectores igual, de modo a facilitar a distribuiç3o dos mesmos.

Tabela 7 - Detalhamento das vigas mistas para cada grupo (cm)

(Continua)

GRUPO	DETALHAMENTO VIGAS MISTAS COM <i>STUD BOLT</i> E TRELIÇADO
1	
2	

Tabela 7 - Detalhamento das vigas mistas para cada grupo (cm)

(Continuação)

GRUPO	DETALHAMENTO VIGAS MISTAS COM <i>STUD BOLT</i> E TRELIÇADO
3	
4	

Tabela 7 - Detalhamento das vigas mistas para cada grupo (cm)

(Continuação)

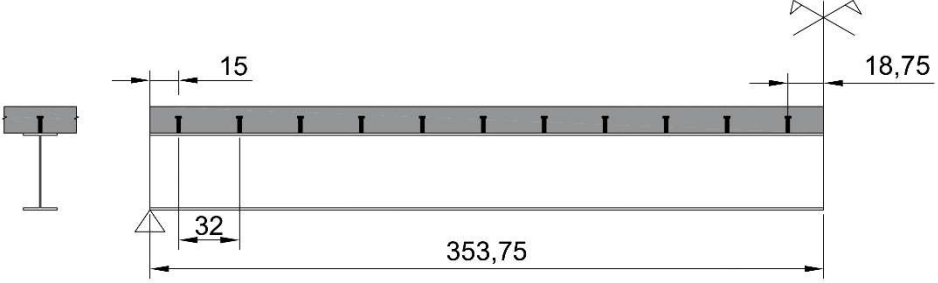
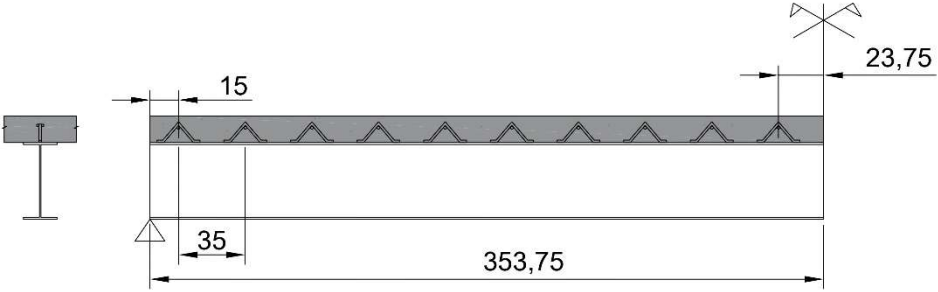
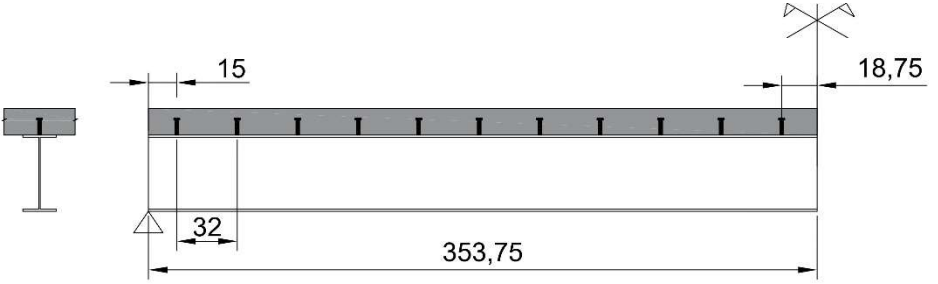
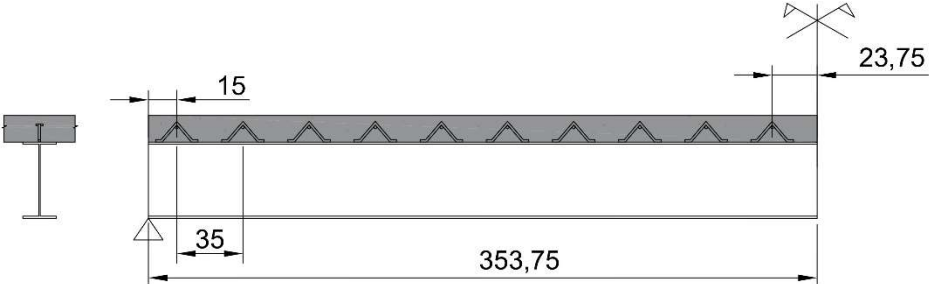
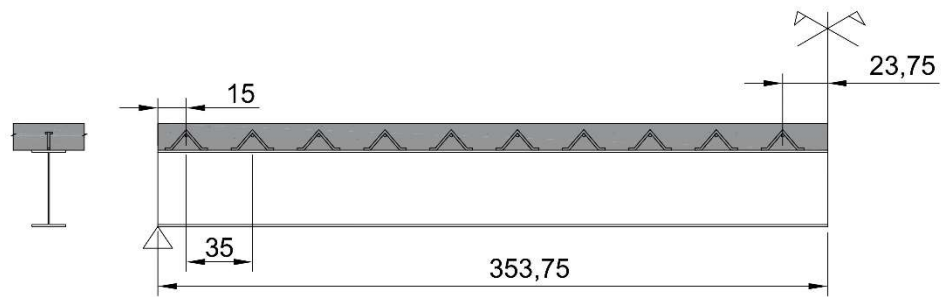
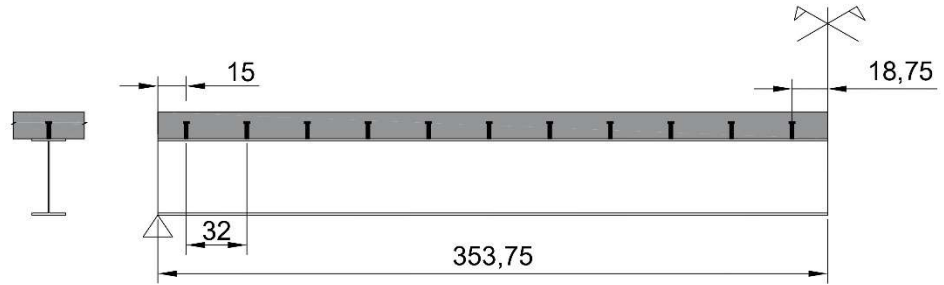
GRUPO	DETALHAMENTO VIGAS MISTAS COM <i>STUD BOLT</i> E TRELIÇADO
	
5	
6	 

Tabela 7 - Detalhamento das vigas mistas para cada grupo (cm)

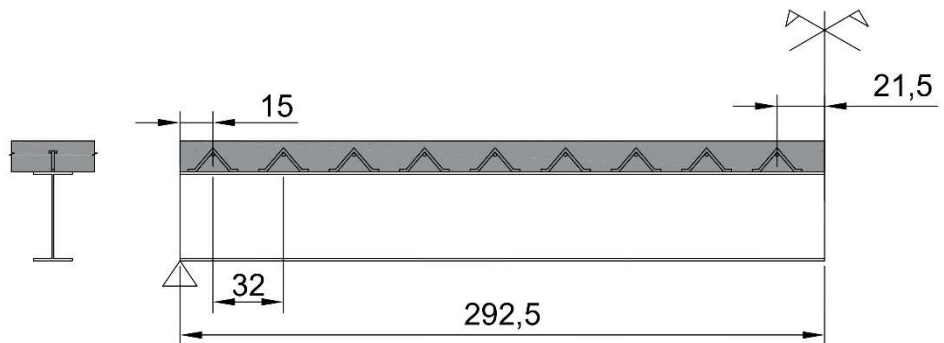
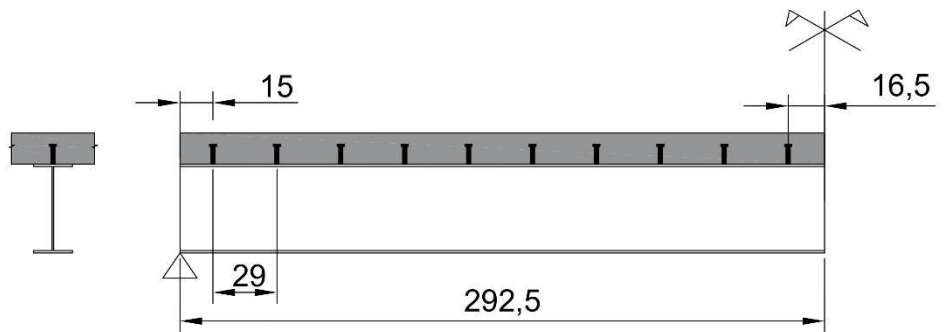
(Conclusão)

GRUPO	DETALHAMENTO VIGAS MISTAS COM <i>STUD BOLT</i> E TRELIÇADO
-------	--

7



8



Fonte: Autoria própria (2023).

4.2. Composição de custos

Neste tópico serão apresentados a composição unitária de cada conector e o custo total de ambos os conectores de cisalhamento.

4.2.1. Composição unitária

Em seguida, procedeu-se à obtenção dos custos unitários de cada conector, considerando os materiais, equipamentos, serviços e mão de obra necessários para a instalação de ambos os conectores. A Tabela 8 apresenta a composição detalhada dos insumos do conector *stud bolt*.

Tabela 8 - Composição do conector *stud bolt*.

CUSTO DO CONECTOR <i>STUD BOLT</i> - UNIDADE							
Fonte	Código	Descrição	Unidade	Coeficiente	Preço	Quantidade	Preço Total (R\$)
						1	
MATERIAIS							
WALS YWA	340000	PINO CONECTOR CISALHAMENTO STUD BOLT - 3/4X3.1/8" (19X80MM)	UN	1	5,017	1	5,017
WALS YWA	340010	COROA CERÂMICA φ19(3/4") P/ METAL BASE (MB)	UN	1	0,509	1	0,509
EQUIPAMENTOS							
ALUG ATEC	-	MÁQUINA DE SOLDA ARCO COM PISTOLA DE SOLDAGEM PARA STUD BOLT	H	0,0078	11,31	0,0078	0,088
SINAPI	2705	ENERGIA ELÉTRICA ATÉ 2000 KWH INDUSTRIAL, SEM DEMANDA	KWH	0,0078	0,66	0,0078	0,005
MÃO DE OBRA							
PROJE ART	-	SOLDADOR/MONTADOR	H	0,0078	22,3	0,0078	0,174
TOTAL							5,79

Fonte: Autoria própria, 2023.

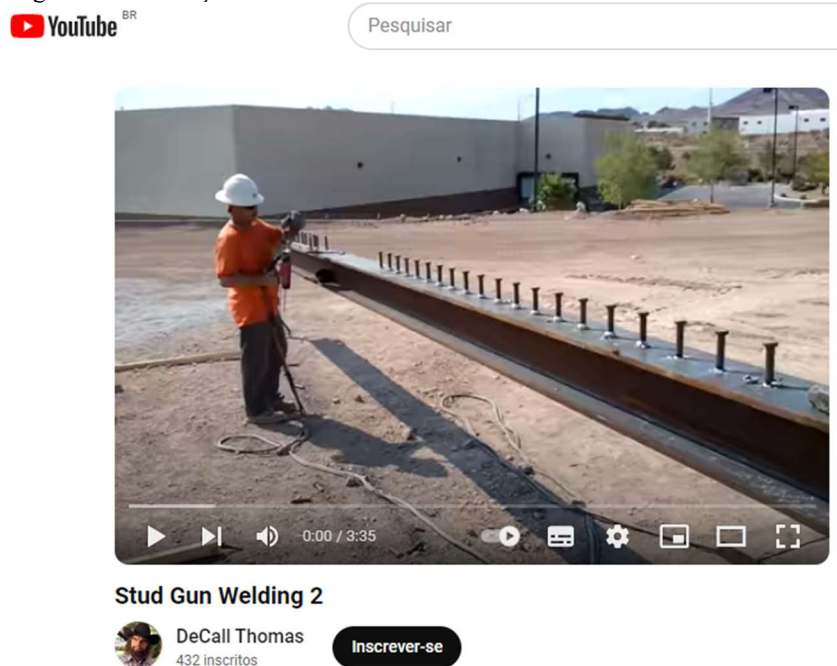
Para compor a composição de custos do conector *stud bolt* da Tabela 8, foi necessário realizar pesquisas em diversas fontes, incluindo empresas fornecedoras de insumos e planilhas de referência de custos do estado do Ceará. Como os valores unitários dos conectores não estavam disponíveis nas tabelas de referência de custos, foi necessário contatar empresas fabricantes desse tipo de material.

Uma das empresas consultadas foi a Walsywa ®, renomada no ramo de produtos metalúrgicos, da qual foram obtidos os orçamentos unitários dos conectores, bem como das coroas cerâmicas para metal-base. A busca de custos de materiais junto às empresas é vantajosa, pois os preços fornecidos refletem o mercado, sendo assim mais precisos.

Outro aspecto relevante é o tempo necessário para a instalação de um conector *stud bolt*. Como as tabelas de custos não fornecem dados de produtividade de solda, fez-se necessário cronometrar o tempo de instalação de um conector a partir da observação da execução do processo em vídeos no YouTube, conforme Figura 23, resultando em um tempo de 28 segundos. Considerando que uma hora possui 3600 segundos, a relação obtida é a seguinte:

$$\frac{28 \text{ s}}{3600 \text{ s}} = 0,0078.$$

Figura 23: Instalação do conector *stud bolt*.



Fonte: Youtube (2023).

Para a instalação deste conector, é necessário o uso de uma máquina de solda arco com pistola, que proporciona rapidez na execução e é fácil de manuseio. Para obter o custo do

aluguel dessa máquina, foi necessário entrar em contato com empresas que disponibilizam o equipamento para locação. A empresa Alugatec, localizada em São Bernardo do Campo - São Paulo, se prontificou em fornecer o custo do aluguel para o período de 30 dias, que varia entre R\$1.300,00 a R\$2.500,00. Devido a especificidade desse equipamento, não foi possível encontrá-lo no estado do Ceará.

Com intuito de obter o custo da locação para uma unidade do conector, realizou-se uma média aritmética dos valores, resultando em R\$1.900,00. O número de dias úteis em um mês são 21 dias, ou seja, $\frac{R\$ 1900,00}{21 \text{ dias}} = R\$ 90,48$ por dia. Como um dia de trabalho possui 8 horas, o custo por hora é: $\frac{R\$ 90,48}{8 \text{ horas}} = R\$ 11,31$. Por fim, multiplicou-se o coeficiente pelo preço e determinou-se o custo de locação da máquina para um conector.

Outro insumo importante de quantificar é a energia elétrica utilizada. A planilha de referência de custo da Caixa Econômica Federal (SINAPI) do estado do Ceará fornece o custo do KWH de energia elétrica para uso da máquina de solda, conforme pode ser observado na Tabela 7. Com base nisso, calculou-se o produto entre o coeficiente e esse custo e obteve-se o preço total gasto de energia por conector.

Quanto à mão de obra, foi obtido o preço diário do soldador por meio da empresa Projeart, especializada em estruturas metálicas e localizada na cidade de Eusébio - CE. Inicialmente, foi calculado o custo da mão de obra por hora, dividindo-se o custo diário por 8 horas de trabalho, resultando em:

$$\frac{R\$ 178,45 \text{ por dia}}{8 \text{ horas}} = R\$ 22,30 \text{ por hora.}$$

Em seguida, esse valor foi multiplicado pelo coeficiente e foi determinado o custo de mão de obra por conector, conforme apresentado na Tabela 8.

Posteriormente, foi elaborada a composição do conector treliçado, e a Tabela 9 mostra essa composição de insumos.

Tabela 9 - Composição do conector treliçado

(Continua)

CUSTO DO CONECTOR TRELIÇADO – UNIDADE							
Fonte	Código	Descrição	Unidade	Coeficiente	Preço	Quantidade	Preço total (R\$)
						1	
MATERIAIS							
SINAPI	43055	AÇO CA-50, 12,5 MM OU 16,0 MM, VERGALHÃO	KG	0,297	8,39	0,297	2,49

Tabela 9 - Composição do conector treliçado

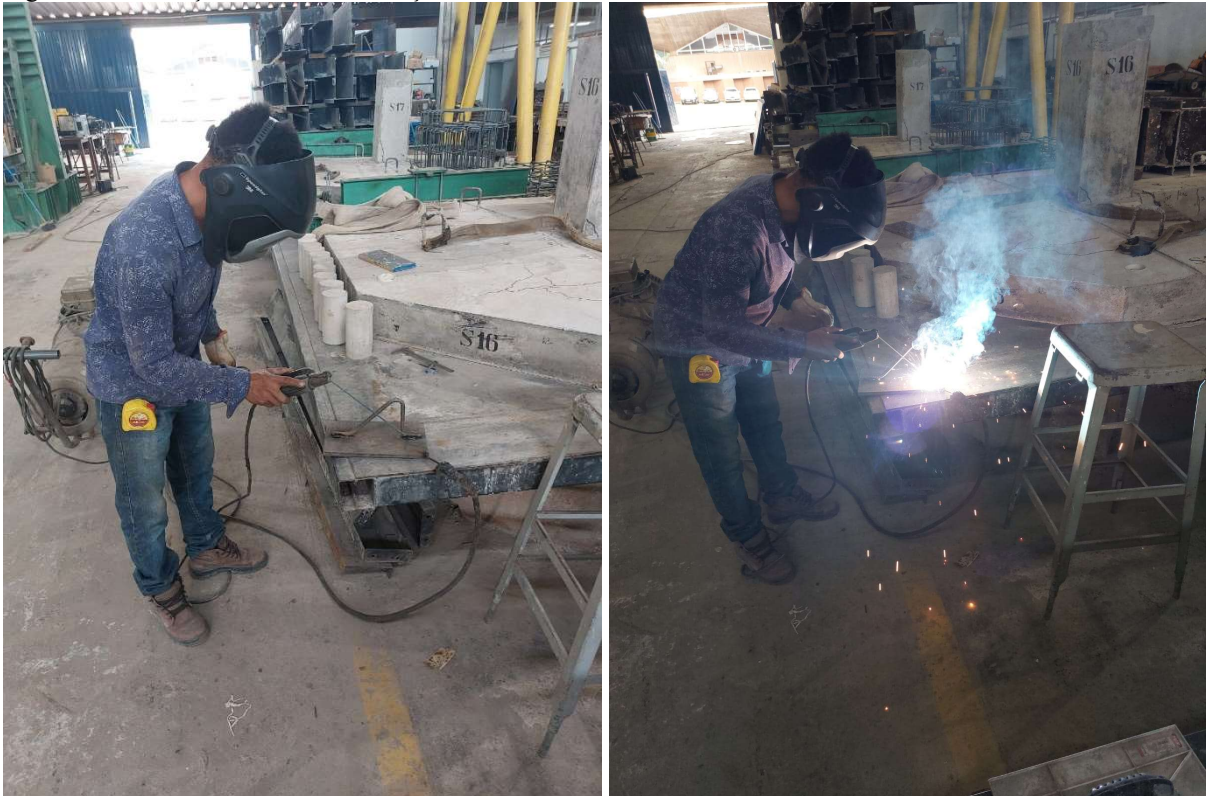
(Conclusão)

CUSTO DO CONECTOR TRELIÇADO – UNIDADE							
Fonte	Código	Descrição	Unidade	Coeficiente	Preço	Quantidade	Preço total (R\$)
						1	
SERVIÇOS							
SINAPI	92804	CORTE E DOBRA DE AÇO CA-50, DIÂMETRO DE 12,5 MM. AF_06/2022	KG	0,297	0,08	0,297	0,02
EQUIPAMENTOS							
CASA DO CONSTRUTOR	-	MÁQUINA DE SOLDA ELÉTRICA COM ELETRODO REVESTIDO 250A	H	0,024	1,85	0,024	0,04
SINAPI	2705	ENERGIA ELÉTRICA ATÉ 2000 KWH INDUSTRIAL, SEM DEMANDA	KWH	0,024	0,66	0,024	0,02
MÃO DE OBRA							
PROJETO	-	SOLDADOR/MONTADOR	H	0,024	22,3	0,024	0,54
TOTAL							3,11

Fonte: Autoria própria, 2023.

Inicialmente, ao considerar o vergalhão de aço CA-50, com bitola de 12,5 mm e comprimento de 12 metros, que possui 11,56 kg, calculou-se o peso por metro de barra, resultando em 0,9633 kg/m. Em seguida, conhecendo o comprimento de um conector, correspondente a 0,308 m, determinou-se o peso unitário, equivalente a 0,297 kg. Além disso, foi medido o tempo necessário para executar um conector treliçado, e obteve-se um tempo de 88 segundos. Essa medição do tempo foi feita através da observação da execução realizada em laboratório, conforme ilustra a Figura 24. Com base nisso, foi possível calcular que 88 segundos representam 0,024 horas.

Figura 24: Instalação do conector treliçado.



Fonte: Filmado por Eric Mateus (2023).

A partir da planilha SINAPI, foi possível determinar o custo por quilograma do vergalhão, bem como o custo de corte e dobra. Ambos os valores foram multiplicados pelo peso unitário do conector. Posteriormente, foi determinado o custo da locação da máquina de solda elétrica, obtendo-se na loja Casa do Construtor, localizada em Fortaleza - CE. Esse custo foi então multiplicado pelo coeficiente obtido pela relação entre o tempo de instalação.

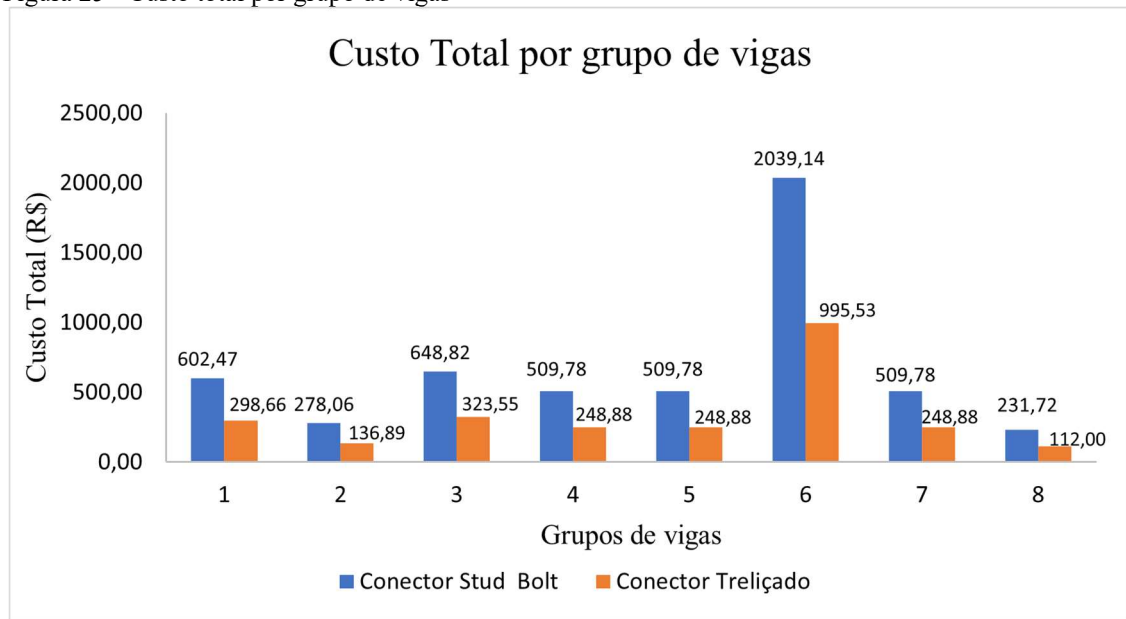
Outro insumo quantificado foi a energia elétrica utilizada. O custo foi fornecido pela planilha SINAPI do Ceará. Em seguida, calculou-se o produto entre o coeficiente e o preço, obtendo o preço total gasto de energia por conector. Por fim, em relação à mão de obra, foi obtido o preço diário do soldador, através da empresa Projeart, equivalente a R\$ 22,30 por hora. Esse valor foi multiplicado pelo coeficiente e determinado o custo de mão de obra por conector.

Ao analisar o custo de cada conector, verificou-se que o conector treliçado apresentou um menor valor unitário. Calculando a diferença de custos unitários, constatou-se que utilizando o conector treliçado há uma economia em torno de 46%.

4.2.2. Custo total dos conectores da edificação

Para determinar o custo total dos conectores de cada grupo de viga da edificação, foram considerados tanto o conector *stud bolt* quanto o treliçado. Para isso, multiplicou-se o número de conectores de cada grupo pelos seus respectivos custos unitários. A Figura 25 apresenta o custo total por grupo para cada conector.

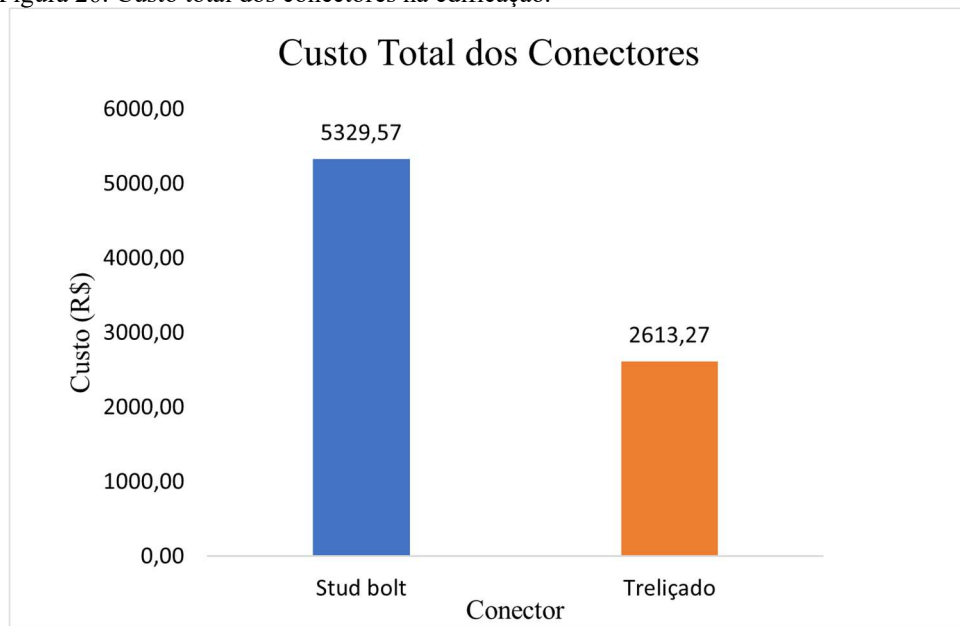
Figura 25 - Custo total por grupo de vigas



Fonte: Autoria própria (2023).

Ao utilizar o conector *stud bolt* nas vigas mistas, o custo total será de R\$ 5.329,57, enquanto com o conector treliçado obteve-se R\$ 2.613,27, apresentando uma economia de aproximadamente R\$ 2.716,30. Esses dados podem ser visualizados no gráfico da Figura 26.

Figura 26: Custo total dos conectores na edificação.



Fonte: Autoria própria (2023).

Ao analisar o gráfico da Figura 26, é possível observar que o conector treliçado proporcionou uma redução no custo total dos conectores da edificação de aproximadamente 51%.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo, realizou-se uma comparação de custos entre o uso de conectores *stud bolt* e treliçado em vigas mistas de aço-concreto. Esse comparativo se deu através da elaboração de duas composições de insumos, uma para cada tipo de conector.

Os custos foram inicialmente obtidos a partir do dimensionamento das vigas mistas da estrutura em estudo, o que permitiu determinar o número de conectores de ambos os tipos. Observou-se que foi necessária uma menor quantidade de conectores treliçados em comparação com os studs bolt, devido à superior resistência do conector treliçado, que é aproximadamente 10% maior.

Com base na composição de insumos, constatou-se que o custo unitário do conector treliçado é 46% menor em relação ao *stud bolt*, evidenciando a vantagem econômica do conector treliçado. Essa diferença refletiu diretamente no custo total dos conectores da estrutura, resultando em uma economia de 51% no custo final.

Em suma, os resultados obtidos reforçam a ideia de que a execução de vigas mistas com conector treliçado apresenta boa viabilidade econômica e desempenho. Além do aspecto econômico, o seu uso se torna facilitado pela disponibilidade de materiais e equipamentos. Por fim, estudantes e pesquisadores terão acesso a dados mais detalhados de custo do uso desses conectores, contribuindo para pesquisas futuras. A indústria da construção civil, por sua vez, poderá incorporar ainda mais o uso da estrutura mista, dado que ela se beneficiará com a redução dos custos que o conector treliçado oferece.

É importante ressaltar que durante a realização deste trabalho, foram enfrentadas algumas dificuldades, especialmente a falta de dados nas tabelas de referência de custos do estado do Ceará. Dessa forma, foi necessário buscar no mercado os dados dos materiais para a composição, sendo necessário coletar essas informações em diferentes fontes e regiões.

Como trabalho futuro sugere-se:

- Montar a composição de custos de uma mesma fonte ou mesma região.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Norma ABNT NBR Brasileira. 2ª edição. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 247 p.
- ALVA, G.M.S. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto**. São Carlos, 2000. 277p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BAMAGA S.O., TAHIR M.M., TAN C.S, SHEK P.N., AGHLARA R. **Testes de push-out em três conectores de cisalhamento inovadores para vigas de concreto e aço formadas a frio**. Elsevier, p. 11, 2019.
- BARBOSA, W. C. S. **Estudo de Conectores de Cisalhamento em Barras de Aço para Vigas Mistas de Aço-Concreto**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016, 511p.
- BRASIL. **Orientações para elaboração de planilhas orçamentárias de obras públicas**. Brasília: TCU, 2014b. 152 p.
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI: **Manual de metodologias e conceitos**. Caixa Econômica Federal. 2ª versão. Brasília: Caixa, 2014.
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI: **Metodologias e Conceitos: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Caixa Econômica Federal. 8. ed. Brasília: Caixa, 2020.
- CÂNDIDO-MARTINS, J. P. S.; COSTA-NEVES, L. F.; VELLASCO, P. C. G. D. S. Experimental evaluation of the structural response of Perfobond shear connectors. **Engineering Structures**, v. 32, n. 8, p. 1976–1985, 2010.
- CARINI, M. R. **Estruturas mistas de aço e concreto: Projeto de edifício comercial**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- CAVALCANTE L. A. S. **Análise comparativa de planilha orçamentária - Estudo de caso no projeto de uma escola na cidade de São José do Sabugi - PB**. Campina Grande, 2020.
- CAVALCANTE, O.R.O. **Estudo de Conectores de Cisalhamento do Tipo ‘V’ em Vigas Mistas**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010, 192p.
- CHAVES, I.A. **Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- CORDEIRO, L. C. S. **Sobre as lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

FAKURY R.H., SILVA A.L.R.C., CALDAS R.B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

LIMA, J. M. **Estudo experimental e numérico do comportamento de vigas mistas aço-concreto com conector treliçado**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021, 163p.

MALITE, M. **Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

SILVA, M. A. **Análise Experimental da resistência ao cisalhamento do conector Hilti X-HVB em vigas mistas de aço e concreto**. Minas Gerais: Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

SILVA, P. H. L. **Dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto**. Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012, 318p.

TRISTÃO, G. A. **Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2002.

VERÍSSIMO, O. S. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento**. Tese de Doutorado em Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 316p.