



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

**NICOLAS STÊNIO FREIRE DIAS**

**ESTUDO NUMÉRICO DE VIGA MISTA À FLEXÃO MODELADO COM  
CONECTORES DE CISALHAMENTO TRELIÇADO SÓLIDO E LINEAR**

**RUSSAS**

**2026**

NICOLAS STÊNIO FREIRE DIAS

ESTUDO NUMÉRICO DE VIGA MISTA À FLEXÃO MODELADO COM CONECTORES  
DE CISALHAMENTO TRELIÇADO SÓLIDO E LINEAR

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. Dr. Jerfson Moura Lima.

RUSSAS

2026



NICOLAS STÊNIO FREIRE DIAS

ESTUDO NUMÉRICO DE VIGA MISTA À FLEXÃO MODELADO COM CONECTORES  
DE CISALHAMENTO TRELIÇADO SÓLIDO E LINEAR

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: 22/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Jonathas Iohanathan Felipe de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

A Deus.

À minha vó, pai e mãe, e a minha namorada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde e força para superar os desafios ao longo desses duros 5 anos de graduação.

À minha avó, Maria Firmino Silva, e aos meus pais, Antônio Marcos Firmino Dias e Antônia Rosenilda Lima Freire, agradeço profundamente por toda ajuda, incentivo e esforço dedicado ao longo da minha trajetória. A confiança que vocês depositaram em mim foi fundamental para que este momento se tornasse possível.

À minha namorada e Engenheira Civil, Livia Cristina Lopes Sousa, sou grato pelo amor, carinho e paciência demonstrados ao longo dessa jornada. Obrigado pelos momentos mais difíceis, conselhos e incentivos. Obrigado, também, pelas generosas correções deste trabalho.

Ao meu orientador, Jerfon Moura Lima, declaro meu sincero agradecimento pela dedicação, orientação, ensinamento e contribuições valiosas para meu desenvolvimento e aprendizado profissional.

Ao LAREB – Laboratório de Reabilitação e Digitalização das Construções, laboratório onde realizei a modelagem numérica, no qual, agradeço a infraestrutura e recursos disponibilizados para que eu realizasse esta pesquisa.

Agradeço ao Luiz, técnico do laboratório LAREB, que me auxiliou com a disponibilidade e suporte ao computador, sendo fundamental para o processamento do modelo numérico.

Agradeço aos Prof. Dr. Jonathas Iohanathan Felipe de Oliveira e Prof. MSc. Eric Mateus Fernandes Bezerra, membros da banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas relevantes contribuições acadêmicas e técnicas.

## RESUMO

Nas últimas décadas, a construção civil tem avançado de formada significativa, impulsionada pelo desenvolvimento de novas tecnologias do mundo moderno. Desse modo, a preocupação com práticas sustentáveis vigora atualmente, visto que estudos apontam a necessidade de redução no consumo de recursos naturais, cuja escassez torna-se cada vez mais evidente. Dessa forma, destaca-se a adoção de sistemas construtivos estruturais mais eficientes, dentre as quais as estruturas mistas aço-concreto. Esse tipo de estrutura é formado pela combinação de concreto armado e aço estrutural, no qual, reduz o uso de recursos naturais, gera menos poluição atmosférica, tem menor consumo de materiais e produz menos resíduos sólidos urbanos, possibilitando uma construção mais leve, rápida e sustentável. Nesse contexto, surge também o conceito de conectores de cisalhamento, que são dispositivos mecânicos com a função de unir os elementos estruturais de modo a trabalharem de forma conjunta. Estudos numéricos de vigas mistas aço-concreto são fundamentais para compreender com maior precisão seu comportamento estrutural. Desse modo, a escolha da geometria dos elementos estruturais influencia diretamente no custo computacional, uma vez que, modelos mais complexos exigem maior número de elementos finitos, graus de liberdade e tempo de processamento. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo de realizar a validação de dois modelos numéricos de uma viga mista VCT-01 proposta, experimentalmente, por Lima (2021), além de uma comparação no custo computacional e influência nos resultados quando o modelo numérico é validado com conector de cisalhamento treliçado como elemento 3D e como elemento linear. Os resultados obtidos foram validados de acordo com o ensaio experimental de Lima (2021), e demonstraram que o modelo com conector linear apresentou uma redução significativa no custo computacional e no tempo de processamento, mantendo uma boa precisão numérica comparado à curva carga (kN) x deslocamento (mm). Isso evidencia que o elemento linear apresentou redução de tempo de processamento de 96,15%, embora apresente erro de 8,36% quanto à carga última, enquanto o modelo com conector 3D erro de 2,98%.

**Palavras-chave:** viga mista aço-concreto; conector de cisalhamento; modelagem numérica.

## ABSTRACT

In recent decades, civil construction has advanced significantly, driven by the development of new technologies in the modern world. In this context, concern for sustainable practices has become increasingly prominent, as studies indicate the need to reduce the consumption of natural resources, whose scarcity has become ever more evident. Accordingly, the adoption of more efficient structural construction systems stands out, among which steel–concrete composite structures deserve special attention. This type of structure is formed by the combination of reinforced concrete and structural steel, which reduces the use of natural resources, generates less atmospheric pollution, requires lower material consumption, and produces fewer urban solid wastes, enabling lighter, faster, and more sustainable construction. In this context, the concept of shear connectors also emerges, which are mechanical devices whose function is to join structural elements so that they work together compositely. Numerical studies of steel–concrete composite beams are essential to more accurately understand their structural behavior. Thus, the choice of the geometry of structural elements directly influences the computational cost, since more complex models require a greater number of finite elements, degrees of freedom, and processing time. Therefore, this study aims to validate two numerical models of a proposed VCT-01 composite beam, experimentally investigated by Lima (2021), as well as to compare the computational cost and the influence on the results when the numerical model is validated using a truss-type shear connector modeled as a 3D element and as a linear element. The obtained results were validated according to the experimental test conducted by Lima (2021) and demonstrated that the model with a linear connector showed a significant reduction in computational cost and processing time, while maintaining good numerical accuracy when compared to the load (kN) versus displacement (mm) curve. This indicates that the linear element model achieved a processing time reduction of 96.15%, although it presented an error of 8.36% in the ultimate load, whereas the model with a 3D connector showed an error of 2.98%.

**Keywords:** steel-concrete composite beam; shear connector; numerical modeling.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Viga mista aço-concreto com conector Stud Bolt .....                           | 17 |
| Figura 2 – Viga mista aço-concreto com conector Crestbond .....                           | 17 |
| Figura 3 – Perfil de aço e conectores de cisalhamento .....                               | 18 |
| Figura 4 – Viga mista aço-concreto formada por conector stud bolt .....                   | 19 |
| Figura 5 – Viga mista aço concreto conectada por conector de cisalhamento treliçado ..... | 19 |
| Figura 6: Elemento finito contínuo e discretizado .....                                   | 20 |
| Figura 7 – Conector de cisalhamento pino com cabeça .....                                 | 22 |
| Figura 8 – Conector de cisalhamento tipo U .....                                          | 22 |
| Figura 9 – Conector de cisalhamento tipo Perforbond .....                                 | 23 |
| Figura 10 – Conector de cisalhamento V .....                                              | 24 |
| Figura 11 – Viga mista aço-concreto com conector treliçado .....                          | 25 |
| Figura 12 – Configuração geométrica do ensaio push-out .....                              | 26 |
| Figura 13 – Vigas mistas aço-concreto .....                                               | 27 |
| Figura 14: Viga mista submetida à carga concentrada .....                                 | 28 |
| Figura 15 – Viga mista submetida à flexão .....                                           | 30 |
| Figura 16 – Comportamento da viga mista no grau de interação .....                        | 30 |
| Figura 17 – Forças atuantes na viga mista .....                                           | 31 |
| Figura 18 – Perfil de aço de alma corrugada .....                                         | 33 |
| Figura 19 – Diagrama de esforço cortante e momento fletor com carregamento distribuído .. | 35 |
| Figura 20: Diagrama de esforço cortante e momento fletor em 3 pontos .....                | 35 |
| Figura 21: Diagrama de esforço cortante e momento fletor em 4 pontos .....                | 36 |
| Figura 22: Viga mista submetida à flexão .....                                            | 37 |
| Figura 23 – Geometria transversal do modelo .....                                         | 37 |
| Figura 24 – Geometria do conector de cisalhamento treliçado .....                         | 38 |
| Figura 25 – Localização dos LVDT's e Extensômeros .....                                   | 38 |
| Figura 26: Comparação dos resultados experimentais .....                                  | 39 |
| Figura 27 – Resultado da variação paramétrica realizada por Lima et al. (2020) .....      | 40 |
| Figura 28 – Distribuição de tensões nos elementos de aço .....                            | 41 |
| Figura 29: Tipos mais utilizados de Elementos Finitos .....                               | 42 |
| Figura 30 – Metodologia do presente trabalho .....                                        | 43 |
| Figura 31 – Perfil de aço do modelo numérico com conector 3D .....                        | 45 |
| Figura 32 – Perfil de aço do modelo numérico com conector linear .....                    | 45 |
| Figura 33 – Laje de concreto do modelo numérico com conector 3D .....                     | 46 |

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 34 – Laje de concreto do modelo numérico com conector linear .....                                  | 46 |
| Figura 35 – Armadura utilizada para ambos os modelos .....                                                 | 46 |
| Figura 36 – Conector de cisalhamento treliçado 3D .....                                                    | 47 |
| Figura 37 – Conector de cisalhamento treliçado linear .....                                                | 47 |
| Figura 38 – Junção dos elementos estruturais com conector 3D.....                                          | 49 |
| Figura 39 – Junção dos elementos estruturais com conector linear .....                                     | 50 |
| Figura 40 – Superfícies de contato perfil de aço-laje de concreto.....                                     | 51 |
| Figura 41 – Restrição entre armação e laje de concreto .....                                               | 52 |
| Figura 42 – Restrição tie entre o conector e perfil metálico.....                                          | 52 |
| Figura 43 – Reação de apoio .....                                                                          | 53 |
| Figura 44 – Região de aplicação do deslocamento.....                                                       | 53 |
| Figura 45 – Curva carga x deslocamento da viga VCT-01 de Lima 2021.....                                    | 54 |
| Figura 46 – Restrição tie entre conector 3D e laje de concreto .....                                       | 55 |
| Figura 47 – Superfície de contato do conector linear e laje de concreto.....                               | 55 |
| Figura 48 – Condições de simetria na direção longitudinal da viga mista .....                              | 56 |
| Figura 49 – Condições de simetria na direção transversal da viga mista .....                               | 56 |
| Figura 50 – Região no perfil onde é o apoio .....                                                          | 57 |
| Figura 51 – Aplicação do deslocamento no meio do vão .....                                                 | 57 |
| Figura 52 – Malha da laje de concreto com conector 3D.....                                                 | 58 |
| Figura 53 – Malha da laje de concreto com conector linear.....                                             | 59 |
| Figura 54 – Malha do perfil de aço com conector 3D .....                                                   | 60 |
| Figura 55 – Malha do perfil de aço com conector linear.....                                                | 60 |
| Figura 56 – Malha do conector 3D .....                                                                     | 61 |
| Figura 57 – Malha do conector linear.....                                                                  | 62 |
| Figura 58 – Malha do reforço da laje .....                                                                 | 62 |
| Figura 59 – Deslocamento vertical na viga mista com conector 3D .....                                      | 63 |
| Figura 60: Deslocamento vertical na viga mista com conector linear.....                                    | 64 |
| Figura 61 – Deslocamento vertical na viga mista experimental de Lima 2021 .....                            | 64 |
| Figura 62 – Tensões na região superior da laje do modelo com conector tridimensional.....                  | 67 |
| Figura 63: Tensões na região da laje do modelo com conector de elemento de viga.....                       | 67 |
| Figura 64 – Tensões na região das hastes dos conectores do modelo com conector<br>tridimensional .....     | 68 |
| Figura 65: Tensões na região das hastes dos conectores do modelo com conector de elemento<br>de viga ..... | 69 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 66 – Tensões de compressão e tração nos conectores 3D .....                    | 69 |
| Figura 67: Concentração de tensões na laje com conector de elemento de viga.....      | 70 |
| Figura 68: Distribuição de tensões no conector ensaio experimental de Lima 2021 ..... | 70 |

## **LISTA DE GRÁFICOS**

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1: Curva plástica de compressão do concreto .....         | 48 |
| Gráfico 2: Curva plástica de tração do concreto.....              | 49 |
| Gráfico 3 – Validação dos modelos numéricos quanto às curvas..... | 66 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Propriedade dos aços .....                                                | 48 |
| Tabela 2: Parâmetros plásticos do concreto.....                                     | 48 |
| Tabela 3: Maior diferença entre as curvas numéricas em relação a experimental ..... | 66 |
| Tabela 4 – Carga última dos ensaios.....                                            | 66 |
| Tabela 5 – Quantidade de nós dos modelos numéricos .....                            | 71 |
| Tabela 6 – Tempo dos modelos numéricos.....                                         | 71 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                     |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                             | <b>16</b> |
| 1.1      | Justificativa.....                                                                                  | 18        |
| 1.2      | Objetivos.....                                                                                      | 20        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                                  | <b>21</b> |
| 2.1      | Conector de cisalhamento.....                                                                       | 21        |
| 2.2      | Viga mista aço-concreto .....                                                                       | 27        |
| 2.3      | Interface aço-concreto .....                                                                        | 28        |
| 2.3.1    | <i>Slip e Uplift .....</i>                                                                          | <b>29</b> |
| 2.3.2    | <i>Grau de interação e conexão.....</i>                                                             | <b>30</b> |
| 2.4      | Histórico das vigas mistas .....                                                                    | 32        |
| 2.5      | Ensaio à flexão.....                                                                                | 33        |
| 2.6      | Programa experimental realizado por Lima (2021).....                                                | 36        |
| 2.7      | Estudos experimentais e numéricos de vigas mistas com conectores de cisalhamento<br>treliçado ..... | 39        |
| 2.8      | Principais tipos de Elemento Finitos .....                                                          | 41        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                                                             | <b>42</b> |
| <b>4</b> | <b>DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO .....</b>                                                     | <b>43</b> |
| 4.1      | Geometria do modelo numérico .....                                                                  | 44        |
| 4.2      | Propriedades dos materiais .....                                                                    | 47        |
| 4.3      | União dos componentes do modelo.....                                                                | 49        |
| 4.4      | Método de análise.....                                                                              | 50        |
| 4.5      | Interações de contato e restrições .....                                                            | 50        |
| 4.5.1    | <i>Interações de contato.....</i>                                                                   | <b>51</b> |
| 4.5.2    | <i>Restrições comuns em ambos os modelos numéricos .....</i>                                        | <b>51</b> |
| 4.5.3    | <i>Restrição utilizada no modelo numérico com conector 3D .....</i>                                 | <b>54</b> |
| 4.5.4    | <i>Restrição utilizada no modelo numérico com conector linear .....</i>                             | <b>55</b> |
| 4.6      | Condições de contorno e carregamento.....                                                           | 56        |

|       |                                                                                                                                  |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7   | Malha e elementos finitos.....                                                                                                   | 57 |
| 4.7.1 | <i>Laje de concreto com conector 3D</i> .....                                                                                    | 58 |
| 4.7.2 | <i>Laje de concreto com conector linear</i> .....                                                                                | 58 |
| 4.7.3 | <i>Perfil de aço com conector 3D</i> .....                                                                                       | 59 |
| 4.7.4 | <i>Perfil de aço com conector linear</i> .....                                                                                   | 60 |
| 4.7.5 | <i>Conector de cisalhamento treliçado 3D</i> .....                                                                               | 61 |
| 4.7.6 | <i>Conector de cisalhamento linear</i> .....                                                                                     | 61 |
| 4.7.7 | <i>Armadura utilizada para ambos os modelos</i> .....                                                                            | 62 |
| 5     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                                                                                             | 63 |
| 5.1   | Validação numérica da viga mista quanto ao deslocamento vertical.....                                                            | 63 |
| 5.2   | Validação numérica da viga mista quanto às curvas cargas (kN) x deslocamento (mm)                                                | 65 |
| 5.3   | Validação numérica da viga mista quanto às distribuições de tensões nas lajes de concreto e nos conectores de cisalhamento ..... | 66 |
| 5.4   | Número de elementos finitos na malha e tempo de processamento .....                                                              | 70 |
| 6     | <b>CONCLUSÕES</b> .....                                                                                                          | 71 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                                                                                         | 73 |

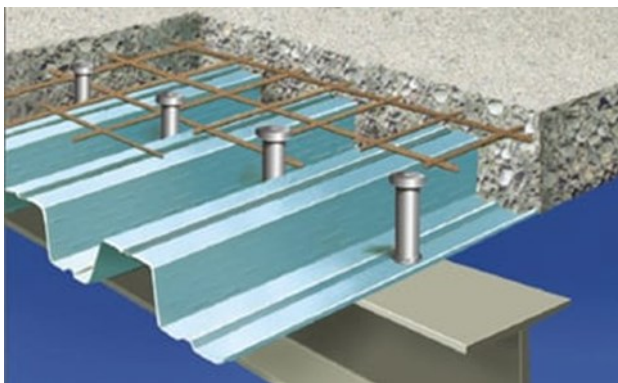
## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil apresenta um crescimento expressivo nos últimos anos, impulsionado por fatores econômicos, tecnológicos e sociais. Esse desenvolvimento é resultado tanto da ampliação dos investimentos públicos e privados, quanto da necessidade crescente de infraestrutura para acompanhar o avanço urbano do país. Dessa forma, embora a expansão da construção civil impulse o desenvolvimento urbano e econômico, também gera uma crescente preocupação com a sustentabilidade. Diante das constantes ameaças aos recursos naturais, os estudos científicos voltados ao desenvolvimento sustentável têm ganhado importância nas últimas décadas, o que impulsiona a busca por soluções que reduzam os impactos ambientais e que garantam a qualidade de vida das futuras gerações.

O aumento do número de obras, aliado ao uso intensivo de materiais como concreto, aço, madeira e cimento, acarreta o maior consumo de recursos naturais e produção significativa de resíduos da construção e demolição. Desse modo, Serinolli (2021) afirma que a construção civil é uma atividade que gera uma quantidade exacerbada de resíduos sólidos provenientes da natureza, sendo responsável pelo alto consumo de matérias primas não renováveis. De acordo com o Portal de Educação Ambiental, o Brasil produziu cerca de 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD), em 2021, o que equivale a 227 quilos de materiais de entulho por habitante. Além disso, segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, em 2022 o setor da construção civil foi responsável por 37% das emissões de CO<sub>2</sub> produzidas no mundo.

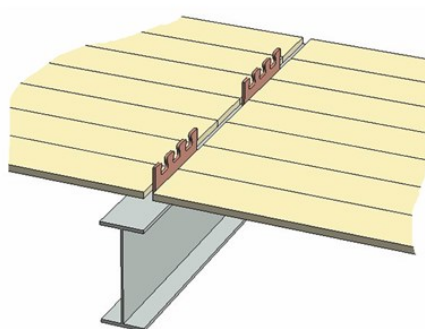
Em resposta a essa necessidade, emerge o sistema de estruturas mistas aço-concreto, no qual, sendo aquele em que um perfil de aço, seja ele laminado, soldado ou formado a frio, trabalha em conjunto com o concreto armado (Fonseca, 2015). No ramo de estruturas mistas surgem as vigas mistas – mostradas nas Figuras 1 e 2 – que são compostas pela associação entre o perfil de aço e laje de concreto, de modo que, são projetadas para que o perfil trabalhe a tração e o concreto resista à compressão (Lima, 2021). Segundo Lima (2018), a viga mista aço-concreto apresenta maior rigidez e menor custo, se for comparada às vigas de aço estrutural ou concreto armado, o que justifica a sua aplicação.

Figura 1 – Viga mista aço-concreto com conector *Stud Bolt*



Fonte: CIMM (2009)

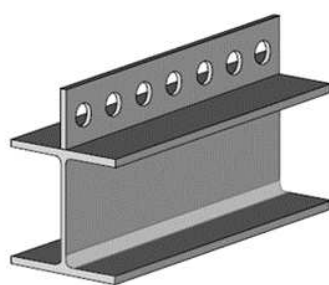
Figura 2 – Viga mista aço-concreto com conector *Crestbond*



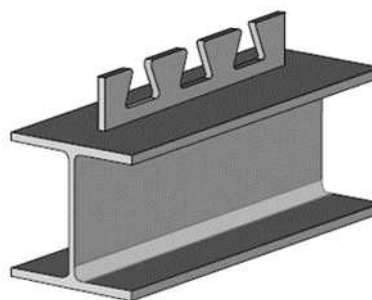
Fonte: Veríssimo (2007)

Aliado a isso, surgem os conectores de cisalhamento, que são dispositivos mecânicos embutidos na laje de concreto e sobrepostos acima da mesa superior do perfil de aço, que podem ser soldados ou cravados nos perfis metálicos, e tem a função de resistir às forças que se desenvolvem na interface entre o perfil de aço e a laje de concreto (Malite, 1990). Dessa forma, é necessária a adição de conectores de cisalhamento para assegurar a interação entre a laje de concreto e o perfil de aço, o que possibilita que a estrutura trabalhe de forma conjunta. Além disso, otimiza o aproveitamento das propriedades dos materiais e assegura que a viga mista apresente comportamento mais resistente, rígido e eficiente (Oliveira, 2001). A Figura 3 mostra um perfil de aço com conector de cisalhamento sobreposto na mesa superior do perfil.

Figura 3 – Perfil de aço e conectores de cisalhamento



(a) Conector Perforbond



(b) Conector Crestbond

Fonte: Veríssimo (2007)

### 1.1 Justificativa

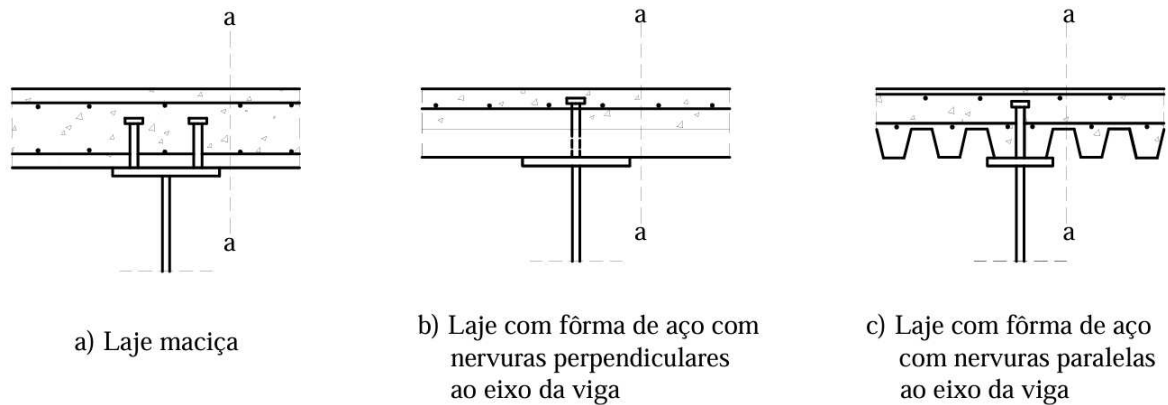
Quando se trata de vigas mistas aço-concreto, devido à necessidade de mão de obra qualificada para a instalação e complexidade de fixação quando se utiliza o conector *stud bolt* nas vigas metálicas, esse tipo de estrutura não é amplamente utilizado diariamente nas construções civis, principalmente em regiões mais afastadas dos grandes centros urbanos. Como afirma Cavalcante (2010), o processo de fixação do conector pino com cabeça ou *stud bolt* no perfil metálico é realizado por meio de solda, de modo que, essa etapa demanda considerável potência elétrica, no qual, a pistola é conectada a uma fonte de grande potência elétrica. Dessa forma, o valor diário da pistola e do gerador é consideravelmente elevado, o que dificulta seu uso nas construções civis.

Para contornar essa situação com o intuito tornar cada vez mais frequente a aplicação de vigas mistas nas construções civis, Barbosa (2016) desenvolveu e estudou experimentalmente um novo tipo de conector de cisalhamento para vigas mistas aço-concreto, fabricado a partir de barras de aço CA-50 dobradas, em formato triangular, como alternativa mais econômica, eficiente e de fácil execução em comparação aos conectores tradicionais, como o *stud bolt*. O conector citado é conhecido como conector de cisalhamento treliçado, de modo que, tem o objetivo de proporcionar a redução dos custos de materiais e reduzir a dependência de equipamentos e instalações específicas para a aplicação dos conectores.

Lima (2021) descreve que o conector de cisalhamento treliçado é fabricado com material de baixo custo, sem dependência de equipamentos específicos para sua instalação. Logo, é produzido por vergalhões de aço CA-50 embutidos na laje de concreto e fixado ao perfil de aço por meio de soldagem em suas hastes horizontais, sendo um material de baixo custo e resistência satisfatória, quando comparado com *stud bolt*. A Figura 4 ilustra uma viga mista

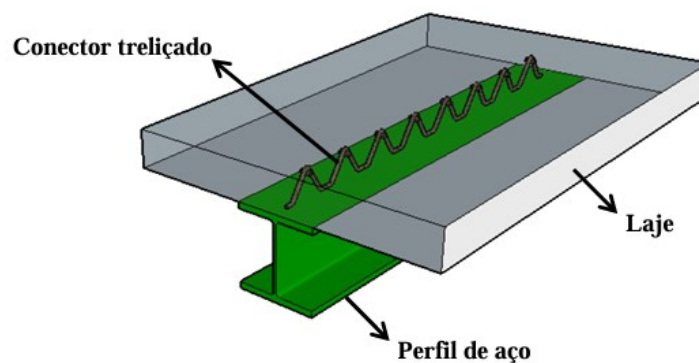
aço-concreto conectada por conector *stud bolt*, enquanto a Figura 5 representa a estrutura de viga mista ligada com conector de cisalhamento treliçado.

Figura 4 – Viga mista aço-concreto formada por conector *stud bolt*



Fonte: NBR 8800 (2008)

Figura 5 – Viga mista aço concreto conectada por conector de cisalhamento treliçado



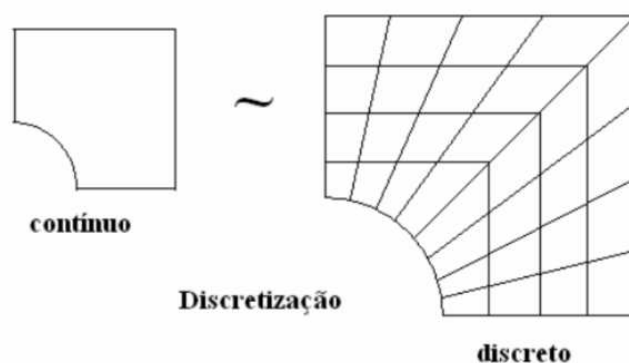
Fonte: Lima (2021)

No que diz respeito à modelagem numérica, sua importância está na capacidade de representar com fidelidade a estrutura real e de resolver problemas complexos por meio de métodos computacionais. Por meio dela, torna-se possível estudar fenômenos que ocorrem nas estruturas reais, como distribuição de tensões, ruptura e danos dos materiais, variação de temperatura, escoamento de fluidos, entre outros. Além disso, a modelagem numérica contribui significativamente para a redução de custos experimentais, pois após serem validadas de acordo com os ensaios experimentais, é possível complementar os estudos experimentais por meio de estudos numéricos, sendo uma ferramenta eficiente para o avanço científico e tecnológico. Autores como Sousa *et al.* (2024), Moura *et al.* (2024), Sreenidhi e Kumar (2024) e Zhang *et al.*

(2025) utilizaram em seus estudos de vigas mista aço-concreto a validação do modelo numérico utilizando softwares de modelagem computacional.

Dentro do tópico de modelagem numérica, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) como sendo uma das principais ferramentas numérica amplamente utilizada para a análise de problemas físicos e de engenharia. Conforme Lotti *et al.* (2006), o MEF pode ser compreendido como uma técnica matemática aplicada à análise de sistemas complexos. Nesse método, um meio contínuo é subdividido em pequenas partes denominadas elementos finitos, que conserva, as propriedades dos materiais ou estrutura original. Cada elemento é descrito por equações diferenciais, as quais, quando reunidas e solucionadas por meio de modelos matemáticos, permitem representar o comportamento global do sistema. A Figura 6 representa um exemplo de discretização de um domínio. À esquerda, a geometria contínua original, representada de forma idealizada e sem divisões. À direita, o mesmo domínio após o processo de discretização, no qual, a região é subdividida em elementos finitos que aproximam a forma geométrica.

Figura 6: Elemento finito contínuo e discretizado



Fonte: Alves (2007)

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo numérico do comportamento à flexão de vigas mistas aço-concreto com conector de cisalhamento treliçado. Como objetivos específicos, o trabalho apresenta:

- Realizar a validação do modelo numérico de viga mista aço-concreto com conector de cisalhamento treliçado;
- Desenvolver o modelo numérico da viga mista utilizando elemento

tridimensional e linear para o conector;

- Realizar a comparação e viabilidade do custo computacional dos dois modelos numéricos validados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo reúne e discute conceitos importantes para entendimento do estudo, de forma a estabelecer a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do presente trabalho. Desse modo, são apresentados os componentes e o comportamento de conectores de cisalhamento de uma estrutura mista, como também um breve histórico referente à pesquisa. Posteriormente, são discutidos estudos relevantes sobre conectores de cisalhamento, evidenciando avanços obtidos por meio de investigações experimentais e numéricas. Por fim, são apresentados os tipos de Elementos Finitos mais utilizados nas pesquisas científicas.

### 2.1 Conector de cisalhamento

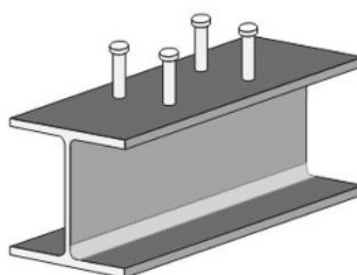
Segundo Barbosa (2016), como a aderência natural entre o perfil de aço, a laje de concreto e as forças de atrito não são consideradas no dimensionamento, é necessário o uso de conectores de cisalhamento para transmitir os esforços longitudinais de cisalhamento na interface aço-concreto. Um conector de cisalhamento ideal é aquele cujo comportamento é caracterizado por deslizamento nulo ou quase nulo. Logo, sua principal função é transferir os esforços cisalhantes longitudinais e transversais que surgem na superfície entre a laje de concreto e o perfil metálico, de modo a trabalharem como um único elemento estrutural.

Nesse contexto, a norma ABNT NBR 8800:2024 estabelece de maneira específica quais são os conectores de cisalhamento reconhecidos para uso em estruturas mistas aço-concreto, de modo que, destacam-se o *stud bolt* (também denominado de pino com cabeça) e o perfil U laminado ou formado a frio. Entretanto, além dos dispositivos normatizados, existem outros tipos de conectores amplamente investigados pela comunidade acadêmica e por especialistas em engenharia de estruturas mistas, destacando-se o conector de cisalhamento *perforbond*, que se caracteriza pela presença de chapas perfuradas; conector V e o conector treliçado, formado por barras de aço CA-50.

O aço utilizado para fabricar o conector *stud bolt* é o ASTM A-108, grau 1020, com resistência à tração mínima de 415 MPa e limite de escoamento não inferior a 345 MPa. Verissimo (2007) afirma que o conector *stud* pode ser aplicado diretamente sobre a fôrma

metálica, para o caso de lajes com fôrma de aço incorporada, sendo uma vantagem construtiva. Além disso, ainda ressalta sobre a facilidade e rapidez de aplicação nas estruturas mistas. Porém, a necessidade de um gerador extra e de uma boa infraestrutura de energia no canteiro de obras dificulta seu uso, que pode ser inviabilizado em diversos casos, dependendo da localização. A Figura 7 representa o formato do conector *stud bolt* sobreposto no perfil metálico.

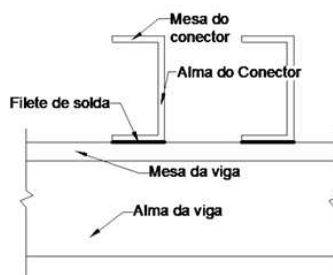
Figura 7 – Conector de cisalhamento pino com cabeça



Fonte: Veríssimo (2007)

Sousa (2022) define que o conector U consiste em um perfil U cortado, no qual, uma das mesas do conector é soldada na mesa superior do perfil de aço, ficando a alma perpendicular ao eixo longitudinal do perfil. Logo, devido à espessura reduzida da alma, ele apresenta inércia reduzida quando comparado com o conector tipo pino com cabeça. Porém, a área de contato entre o perfil de aço e o conector é bem maior, resultando em uma melhor distribuição de tensões. A Figura 8 ilustra o conector de cisalhamento tipo U.

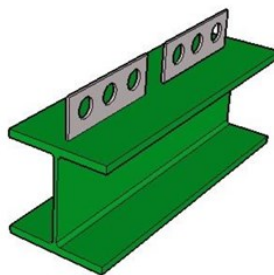
Figura 8 – Conector de cisalhamento tipo U



Fonte: Oliveira (2007)

Conforme Veríssimo (2007), o conector tipo *Perforbond* consiste em uma chapa de aço plana, com furos circulares, soldada longitudinalmente sobre um perfil metálico que, posteriormente, é envolvida com concreto. Esse tipo de conector foi idealizado a partir da necessidade de um conector rígido, para não permitir deslizamento relativo significativo entre o aço e o concreto, e ao mesmo tempo, só envolvesse deformações plásticas. Portanto, o comportamento mecânico do *Perforbond* está associado à resistência ao cisalhamento, ao efeito da armadura transversal da laje, resistência da própria chapa do conector e a resistência ao cisalhamento do concreto confinado no interior dos furos do conector. A Figura 9 ilustra o conector de cisalhamento para este caso.

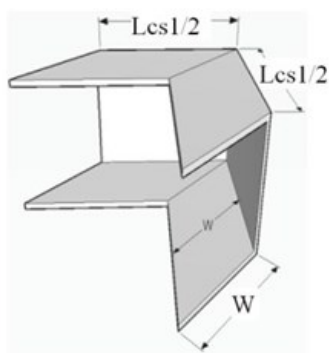
Figura 9 – Conector de cisalhamento tipo *Perforbond*



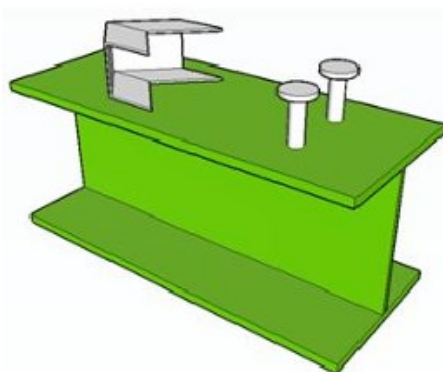
Fonte: Lima (2021)

O conector de cisalhamento do tipo V apresenta uma considerável área de contato com o concreto e aço, assim como o conector U, o que reduz os efeitos de fissuração no concreto (Veríssimo, 2007). Ainda segundo Veríssimo (2007), a alteração do conector U para V aumentou consideravelmente o momento de inércia da peça. Dessa forma, o conector foi desenvolvido por Cavalcante (2010), de modo que, em seu estudo, apresentou menores deslizamentos longitudinais e horizontais e uma melhor distribuição de tensões, quando comparado com o *stud bolt*. A Figura 10 ilustra o conector V desenvolvido por Cavalcante (2010).

Figura 10 – Conector de cisalhamento V



(a) conector pronto



(b) fixação dos conectores

Fonte: Cavalcante (2010)

Barbosa (2016) foi o pioneiro no desenvolvimento do conector de cisalhamento treliçado, no qual, em seu estudo, avaliou-se a definição de uma geometria adequada para o conector para atender a ductibilidade, economia, resistência ao cisalhamento longitudinal e transversal. Barbosa (2016) ainda define que os conectores de cisalhamento treliçados apresentam diversas vantagens quando comparados com os conectores *stud bolt* e U, tais como processo de fabricação e instalação simples, pois o aço CA-50 pode ser encontrado facilmente no mercado da construção civil e pode ser facilmente fixado na mesa superior do perfil metálico; bom comportamento quanto aos deslizamentos longitudinais e transversais, ou seja, *slip* e *uplift*, respectivamente, e altos valores de capacidade resistente. Logo, a eficiência do conector foi devidamente comprovada a partir das análises dos resultados obtidos, o que demonstra sua confiabilidade e adequação.

A Figura 11 ilustra 2 tipos de conectores de cisalhamento treliçado, de modo que, o item (a) refere-se ao conector isósceles, ou seja, apresenta ângulo entre as hastes em torno de  $60^\circ$ . O item (b) da Figura 11 representa o conector reto, pois possui uma haste ortogonal e outra inclinada em relação ao eixo longitudinal do perfil de aço, com o ângulo entre as hastes de  $50^\circ$ . Nesse contexto, o conector isóscele apresenta simetria vantajosa, uma vez que proporciona um comportamento estrutural equilibrado. Assim, ambos os conectores apresentam comportamentos estruturais semelhantes, embora as diferenças geométricas influenciem o modo de como os esforços são distribuídos entre as pernas do conector, conforme apresentado por Lima (2018) e Moura *et al.* (2024) em seus resultados numéricos, onde cada autor realizou um estudo para o conector isósceles e linear, respectivamente.

Figura 11 – Viga mista aço-concreto com conector treliçado



(a) conector treliçado isóceles



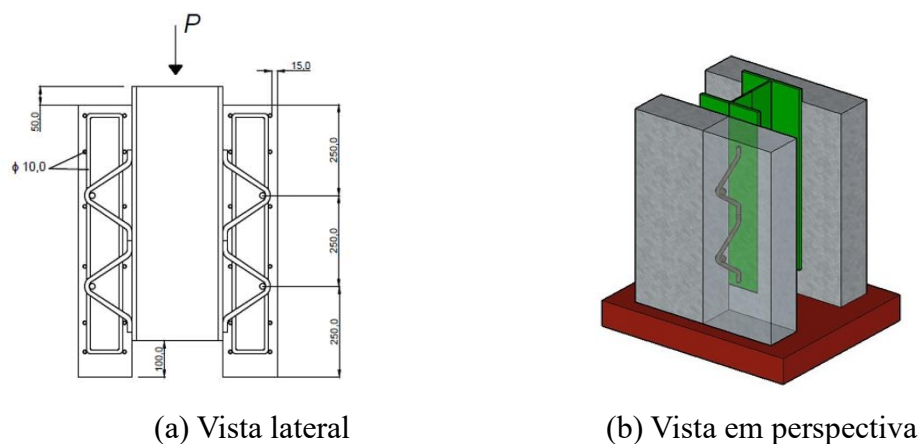
(b) conector treliçado reto

Fonte: Barbosa (2016)

A quantidade do número de conectores de cisalhamento treliçado em uma viga mista aço-concreto depende diretamente do grau de conexão entre o perfil de aço, laje de concreto e do próprio conector, bem como da força longitudinal transferida do conector de cisalhamento entre o perfil e a laje de concreto. Dessa forma, a capacidade resistente de conectores de cisalhamento pode ser determinada por meio de equações estabelecidas em normas técnicas ou a partir da execução do ensaio *push-out*, como ocorre no *stud bolt* e conector U. Já para conectores alternativos, como o tipo treliçado, a determinação da resistência exige a realização de ensaios experimentais, como o ensaio *push-out* (Lima, 2021).

Para desenvolver o estudo da capacidade resistente dos conectores de cisalhamento, a norma europeia EN 1994-1-1:2004 estabelece diretrizes específicas para a realização do ensaio *push-out*, de modo que, tem o objetivo avaliar o comportamento mecânico e a resistência ao cisalhamento dos conectores. O ensaio *push-out* consiste, de forma geral, na aplicação de uma força vertical em um perfil metálico parcialmente embutido em blocos de concreto, de modo a induzir esforços de cisalhamento nos conectores. A Figura 12 representa uma configuração do ensaio *push-out*.

Figura 12 – Configuração geométrica do ensaio *push-out*



Fonte: Lima (2021)

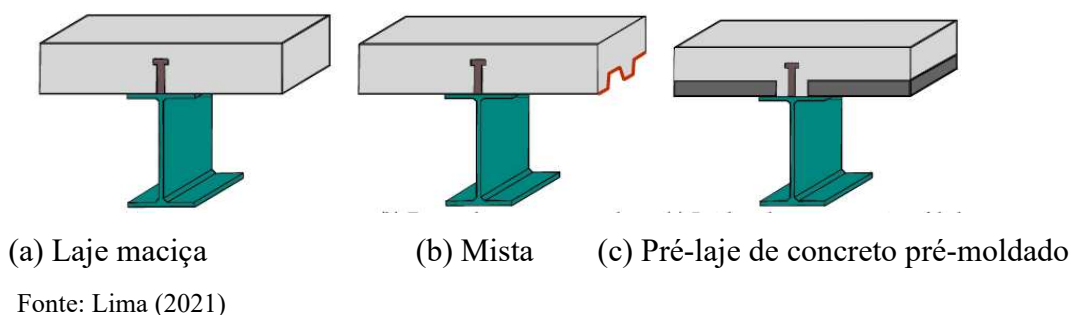
Esse procedimento pode ser realizado tanto de forma experimental quanto por meio de modelagem numérica, o que permite a simulação do ensaio e a análise do comportamento dos conectores sob diferentes condições geométricas. No ensaio experimental molda-se um corpo de prova constituído por um perfil de aço, geralmente, do tipo I com duas lajes de concreto nas laterais. Os conectores de cisalhamento são fixados nas mesas do perfil e embutidos no concreto. Dessa forma, o corpo de prova é colocado em uma máquina de ensaio, onde a força é aplicada verticalmente no perfil de aço, de modo que, este carregamento tende a deslocar o perfil de aço em relação às lajes. É nesse momento que os conectores de cisalhamento desempenham suas funções – resistir aos esforços de cisalhamento e transferindo as cargas entre os materiais.

O ensaio *push-out* numérico busca reproduzir computacionalmente o mesmo comportamento que ocorre no ensaio experimental de laboratório. Na modelagem numérica, é necessário considerar aspectos fundamentais como a geometria do ensaio, as propriedades dos materiais, o contato entre o aço e concreto e o comportamento não linear associado tanto ao concreto quanto o aço. Nesse contexto, o software Abaqus é amplamente utilizado nesse tipo de estudo, pois oferece recursos específicos para representar e analisar esses fenômenos. Além disso, com o software, é possível, também, analisar detalhes que dificilmente seriam capturados em laboratório, como realizar um estudo paramétrico, ou seja, fazer uma variação da altura do conector, ângulo entre as hastes do conector e diâmetro do conector, por exemplo.

## 2.2 Viga mista aço-concreto

De acordo com a ABNT NBR 8800:2024 as vigas mistas de aço-concreto consistem em um componente de aço simétrico em relação ao plano de flexão, podendo ser o perfil I ou outros perfis como, caixão ou tubular retangular e uma laje de concreto acima de sua face superior. Assim, os tipos de laje podem ser maciças moldada no local, mista e pré-laje de concreto pré-moldada. Nessas estruturas, o aço e o concreto trabalham de forma conjunta, onde tem-se um aproveitamento mais eficiente das propriedades de cada material, de modo que, a viga é feita de um perfil de aço, no qual, irá resistir aos esforços de tração, enquanto a laje de concreto é responsável por resistir aos esforços de compressão (Malite, 1990). Dessa forma, as vigas mistas de aço-concreto são elementos estruturais amplamente utilizados em construções civis, principalmente em obras que demandam grandes vãos e elevadas cargas, como pontes e edifícios de grande porte. A figura 13 apresenta, de forma ilustrativa, os principais tipos de vigas mistas aço-concreto descrito na literatura especializada, ou seja, ABNT NBR 8800:2024.

Figura 13 – Vigas mistas aço-concreto



Fakury (2011) afirma que o aço é o material estrutural que apresenta maior índice de resistência (relação entre resistência e peso específico) e, por essa razão, seus componentes estruturais apresentam menor seção transversal com menores dimensões. Portanto, é mais adequado seu uso em obras onde necessita vencer grandes vãos. Por essas vantagens, as vigas mistas são soluções econômicas e estruturais, pois quando comparadas às vigas metálicas ou vigas de concreto armado, por exemplo, apresentam, de modo geral, menor peso, perfil de aço com maior altura, maior rigidez e possibilidade de vencer maiores vãos e, conseqüentemente, menor custo, segundo Lima (2021).

No âmbito da engenharia civil atual, é essencial a adoção de soluções estruturais que integrem eficiência estrutural, viabilidade econômica e, principalmente, os requisitos de

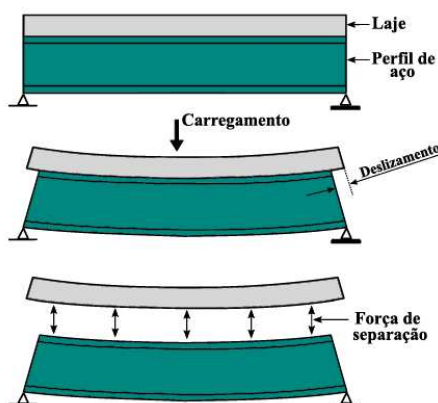
sustentabilidade. Nesse contexto, surgem as estruturas mistas como uma alternativa totalmente viável, uma vez que proporcionam economia de materiais quando comparadas às estruturas de concreto armado, visto que permitem a adoção de menores seções transversais (Fakury, 2011). Essa redução decorre, principalmente, da utilização otimizada das propriedades mecânicas do aço e do concreto, o que permite a concepção de elementos estruturais com seções transversais mais esbeltas e ao mesmo tempo, altamente resistentes.

### 2.3 Interface aço-concreto

Barbosa (2016) define que a ação mista se caracteriza pela interação entre dois ou mais elementos estruturais, de modo que, seus materiais sejam distintos, como é o caso do perfil de aço e da laje de concreto. Assim, quando devidamente ligados, passam a se comportar estruturalmente como uma única peça, no qual, isso se dá por conta dos conectores de cisalhamento, que são dispositivos mecânicos responsáveis por transmitir os esforços de cisalhamento e impedir o deslocamento relativo entre eles. Ao promover essa ligação, os conectores asseguram que as deformações ocorram de maneira compatível e que cada material contribua com suas melhores propriedades mecânicas, sendo o aço trabalhando a tração e o concreto à compressão.

Ao não existir a ligação dos materiais por meio dos conectores de cisalhamento, os elementos irão se deformar de forma independente, conseqüentemente, suas superfícies terão diferentes deformações, o que ocasiona um deslizamento relativo entre as partes. A Figura 14 apresenta uma viga biapoiada, submetida à uma carga concentrada no meio do vão, na qual, é possível observar a ação conjunta dos elementos estruturais sem a adição de conectores de cisalhamento.

Figura 14: Viga mista submetida à carga concentrada



Fonte: Lima (2021)

Segundo Queiroz *et al* (2012), ao se deformar, cada superfície da interface estará sendo submetida a tensões diferentes, sendo a superfície superior da viga apresentando tensões de compressão e, portanto, sendo encurtada, enquanto a superfície inferior da laje está sujeita a tensões de tração e, portanto, irá ser alongada. Além disso, irá haver deslizamento relativo entre as superfícies na região de contato. Ainda de acordo com Queiroz *et al.* (2012), considerando, agora, que os dois elementos sejam interligados por conectores de cisalhamento e resistência infinita para que possam sofrer deformações como um único elemento. Desenvolvem-se forças horizontais que encurtam a face inferior da laje e, simultaneamente, alonga a face superior da viga, de modo que, não haja deslizamento significativo entre o aço e o concreto.

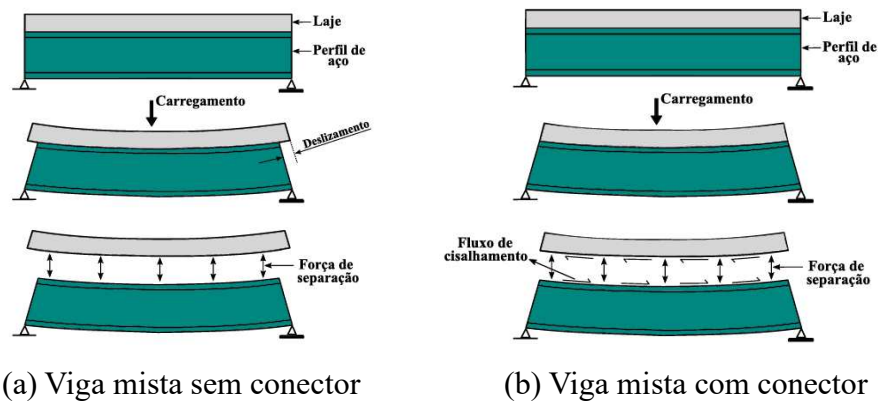
### 2.3.1 *Slip e Uplift*

Conforme Lima (2021), o comportamento das vigas mistas é dependente da conexão entre seus componentes, perfil de aço e laje de concreto. Dessa forma, os conectores de cisalhamento, que estão fixos no perfil de aço, são responsáveis para limitar o deslizamento longitudinal da interface aço-concreto, ou *slip*, e a separação transversal da interface aço-concreto, denominado *uplift*.

Para exemplificar o fluxo de cisalhamento longitudinal e transversal, pode-se analisar a Figura 15, no qual, observa-se o comportamento de vigas mistas submetidas à flexão sob ação de uma carga concentrada no meio do vão, sendo visualizada quando não há conectores e quando há conectores. Quando não há conectores, como é o caso da Figura 15 (a), a interface aço-concreto não possui ligação rígida suficiente para transmitir integralmente os esforços de cisalhamento devido à flexão, ocorrendo assim o *slip*. Além do deslizamento, observa-se também o fenômeno de *uplift*, sendo ele o deslocamento vertical relativo entre a viga e a laje. Esse deslizamento ocorre, principalmente, nas regiões onde as forças internas tendem a afastar os dois materiais (Lima, 2021).

Por outro lado, quando há conectores de cisalhamento, como na Figura 15 (b), esses dispositivos criam uma ligação entre o aço e o concreto, transmitindo o cisalhamento e restringindo o deslizamento horizontal. Além disso, a presença dos conectores reduz drasticamente o deslocamento vertical, pois eles contribuem para manter a união vertical entre os materiais que compõem a viga mista. Portanto, a viga mista passa a trabalhar de maneira monolítica, unindo a resistência à compressão do concreto e a resistência à tração do aço, resultando em uma menor deformação da estrutura sob uma mesma solicitação (Barbosa, 2016).

Figura 15 – Viga mista submetida à flexão

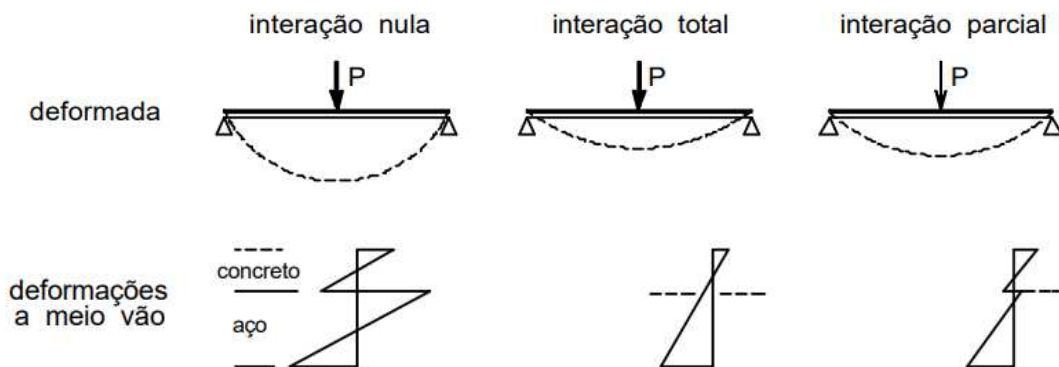


Fonte: Lima (2021)

### 2.3.2 Grau de interação e conexão

Malite (1990) afirma que a interação total implica em não haver deslizamento relativo entre aço e concreto, enquanto a interação parcial implica em escorregamento relativo, ocasionando uma descontinuidade no diagrama de tensões, ou seja, o grau de interação mede o quanto a ligação aço-concreto se aproxima do comportamento ideal, no caso a interação total. Cavalcante (2010) define que o grau de interação está relacionado com o deslizamento da laje em relação ao perfil de aço, de modo que, a interação total é considerada quando a laje está totalmente solidária ao perfil, de modo que o deslizamento é nulo. Já a interação parcial representa um meio termo, em que existe um deslizamento na interface aço-concreto. A Figura 16 ilustra o comportamento a deformações quando temos uma interação nula, interação total e uma interação parcial.

Figura 16 – Comportamento da viga mista no grau de interação



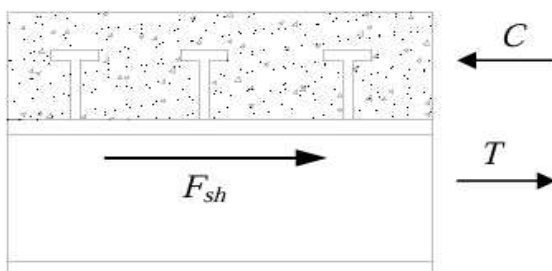
Fonte: Malite (1990)

Na primeira linha temos a representação de uma viga mista simplesmente apoiada, submetida a uma carga concentrada  $P$  no meio do vão. Na segunda linha pode ser visualizada as deformações da viga mista no meio do vão. Dessa forma, com a interação nula, ou seja, sem haver nenhuma interação, percebe-se que a estrutura mista apresenta duas linhas neutras, a linha neutra do aço e a do concreto, de modo que, o aço e o concreto tem comportamento à tração e compressão. Na interação total, pode ser analisado que existe apenas uma linha neutra para a estrutura, de modo que, o concreto irá trabalhar à compressão e o aço à tração, o que é ideal no conceito de vigas mistas aço-concreto. Na interação parcial, é visualizada duas linhas neutras, uma para o concreto e uma para o aço, logo, cada material irá se comportar à compressão e tração. Ou seja, embora seja em pequena escala, o aço irá ter uma parte comprimida e o concreto parte tracionada.

De acordo com Malite (1990), o grau de conexão de cisalhamento completo ocorre onde a seção mais solicitada da viga consegue atingir sua capacidade máxima, sem ocorrer a ruptura, enquanto a conexão parcial ocorre quando o número de conectores de cisalhamento for menor que o número de conectores correspondente à conexão completa. Assim, o grau de conexão diz respeito ao conjunto de elementos e detalhes construtivos que promovem a ligação mecânica entre o aço e o concreto. Segundo com Cavalcante (2010), o grau de conexão está relacionado à resistência dos elementos estruturais entre perfil, laje e os conectores de cisalhamento que compõem a viga mista.

Dessa forma, o equilíbrio dos esforços na seção de uma viga mista depende da resistência à compressão da laje ( $C$ ), da resistência à tração da viga metálica ( $T$ ) e da ligação de cisalhamento dos elementos estruturais referente aos conectores ( $F_{SH}$ ), este sendo somada pela soma das resistências individuais dos conectores de cisalhamento. A Figura 17 ilustra a interação entre a compressão na laje ( $C$ ), a tração no concreto ( $T$ ) e a resistência ao cisalhamento dos conectores ( $F_{SH}$ ).

Figura 17 – Forças atuantes na viga mista



Fonte: Cavalcante (2010)

Dessa forma, o grau de conexão definido pela ABNT NBR 8800:2024, pode ser calculado da seguinte forma:

$$\eta = \frac{F_{sh}}{F_{sh,min}}$$

Onde:

$\eta$  - grau de conexão de cisalhamento;

$F_{sh}$  - somatório das resistências dos conectores de cisalhamento;

$F_{sh,min}$  – resistência mínima de cisalhamento necessária para garantir conexão completa na interface aço-concreto, ou seja, é o menor valor dentre a força resultante máxima resistida pela laje de concreto e a força resultante que produz escoamento do aço.

Portanto, a viga mista possui grau de interação completa quando o valor calculado é  $\eta \geq 1$ , de mesmo modo, a viga possui grau de interação parcial quando o valor calculado é  $\eta < 1$ .

Conforme Lima (2021), quando temos o grau de interação total, a viga mista irá colapsar por flexão, pois a conexão é capaz de transferir os esforços causados entre os componentes da estrutura mista. Quando temos grau de interação parcial, a ruptura irá ocorrer por conexão, visto que, os conectores irão se deformar muito ou entrarão em ruptura ocasionando um deslizamento excessivo na interface aço concreto.

## 2.4 Histórico das vigas mistas

Barbosa (2016) afirma que, em 1929, Caughey e Scott publicaram um artigo sobre o dimensionamento de vigas mistas, no qual, pela primeira vez foi referida a necessidade da existência de conectores para ligar os dois materiais. Porém, a regulamentação da construção mista surgiu em 1944 nos Estados Unidos da América. Barbosa (2016) ainda define que antes da década de 1970 várias pontes foram construídas com um sistema híbrido de lajes de concreto simplesmente apoiadas sobre vigas de aço, de modo que, os dois materiais trabalhavam de forma independente. Assim, para Lima (2021), a partir dos anos 80, as pesquisas no campo das estruturas mistas se atentaram aos conectores de cisalhamento.

Conforme Martins (2009), a primeira viga de alma corrugada foi fabricada em 1966 na Suécia. Porém, somente em 1986, na França, foi construída a primeira ponte com perfil de alma trapezoidal, como é o caso a ponte Congac. O objetivo destas inovações era reduzir o peso das estruturas que envolviam grandes vãos, além dos custos de fabricação, especialmente em

pontes. Devido ao bom comportamento mecânico e elevada eficiência estrutural, os perfis de alma corrugadas estão sendo empregados na construção de galpões comerciais, edifícios de grande porte e passarelas de pedestres. A Figura 14 ilustra um perfil metálica de alma corrugada.

Figura 18 – Perfil de aço de alma corrugada



Fonte: Martins (2009)

No Brasil, a utilização de estruturas mistas é restrita a poucos edifícios e pontes entre os anos de 1950 e 1960. Entretanto, nas últimas décadas a demanda por sistemas mistos tem aumentado de forma significativa, impulsionada tanto pelas suas vantagens construtiva quanto pelo avanço das tecnologias de cálculo, fabricação e execução, como afirma Veríssimo (2007). Entre os benefícios, destacam-se a otimização do uso dos materiais, redução do peso próprio das estruturas, maior rapidez de execução e a melhoria do desempenho estrutural.

No campo das pesquisas acadêmicas, o comportamento de vigas mistas biapoiadas é relativamente conhecido, resultado de diversos estudos experimentais e numéricos realizados ao longo das últimas décadas. Assim, as investigações mais recentes têm direcionado seu foco para aspectos como a eficiência de diferentes mecanismos de conexão entre aço e concreto, bem como o estudo de novas formas de vinculação e interação estrutural. Dessa forma, Malite destaca-se como pioneiro sobre estruturas mistas, de modo que, seu trabalho teve início com a dissertação de mestrado, defendida em 1990 pela Universidade de São Paulo, dando continuidade em seu doutorado, consolidando uma base teórica e experimental que serviria de referência para pesquisas subsequente no país.

## 2.5 Ensaio à flexão

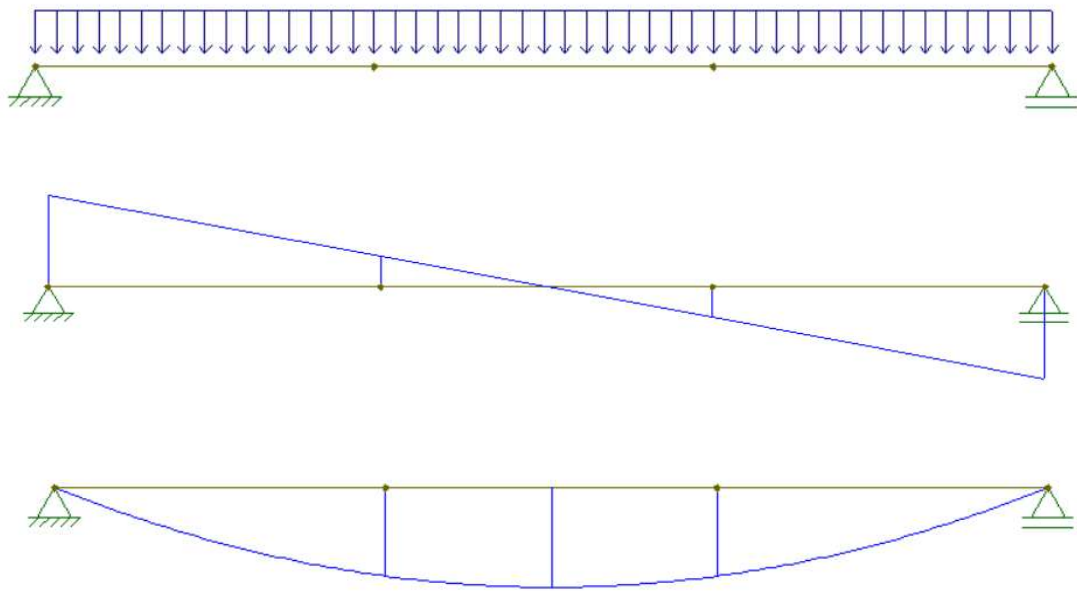
O ensaio à flexão em vigas mistas aço-concreto possui papel fundamental na investigação do comportamento estrutural desse sistema, pois permite avaliar, de forma

controlada, a resposta da viga quando submetida aos esforços perpendiculares ao seu eixo, sendo de forma semelhante às situações de serviços. Dessa forma, o ensaio à flexão possibilita a verificação de aspectos como a capacidade resistente última, os modos de ruptura e a ocorrência de escorregamentos relativos entre a laje de concreto e a viga metálica. Tais observações permitem compreender que o comportamento idealizado em modelos teóricos se repete na prática, fornecendo subsídios para a calibração de formulações analíticas e modelos numéricos. O estudo da flexão em vigas trás o entendimento dos mecanismos resistentes proporcionados pelo concreto sob compressão e pelo aço sob tração (Bastos, 2015).

Os ensaios de 3 e 4 pontos são as principais configurações do ensaio à flexão em vigas, de modo que, o método de 4 pontos é o mais utilizado em estudo de flexão, uma vez que, nesse tipo de ensaio, a região central da viga fica submetida apenas ao momento fletor constante, sem a presença de esforço cortante. Logo, a análise fica mais precisa e concentrada apenas no comportamento à flexão. Já nos ensaios com carga uniformemente distribuída ou em 3 pontos, a viga sofre tanto o momento fletor quanto o esforço cortante. Apesar de o cisalhamento também ser uma solicitação importante em estruturas, ela não é o foco quando o objetivo o estudo específico da flexão.

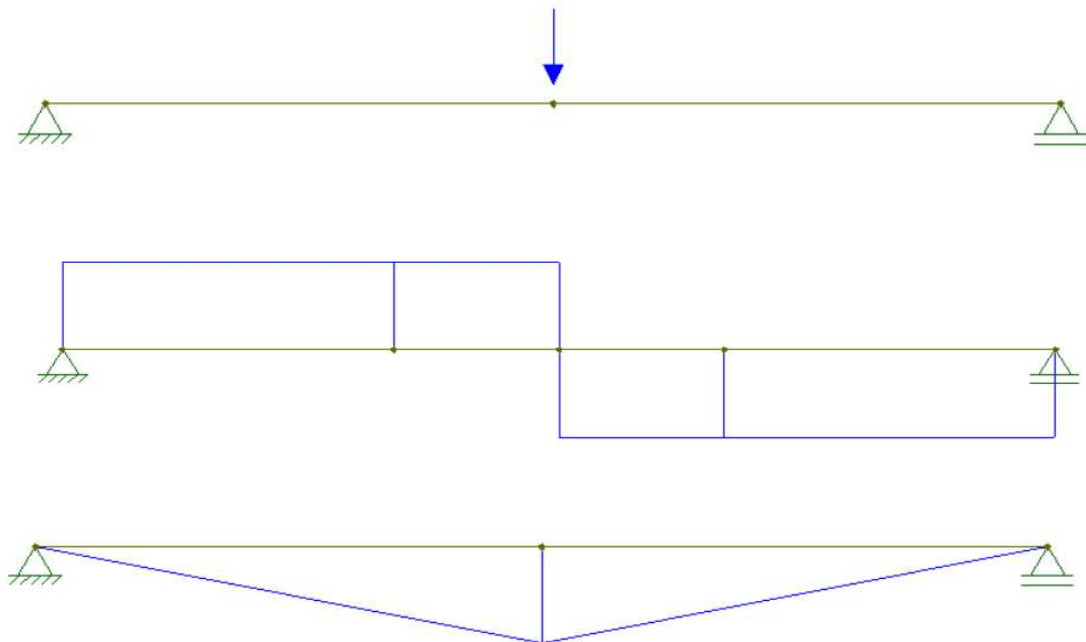
Nas figuras a seguir, estão representadas as diferentes formas de carregamento aplicadas a uma viga biapoiada, e seus respectivos diagramas de esforços cortantes e de momentos fletores. Dessa forma, a Figura 19 retrata uma viga biapoiada com carregamento uniformemente distribuído, de modo que, o diagrama de esforço cortante é máximo nas extremidades e zero no meio do vão; já o diagrama de momento fletor é zero nas extremidades e máximo no meio do vão. A Figura 20 representa uma viga mista carregada por um esforço pontual no meio de vão, no qual, pode-se observar que o esforço cortante toca no ponto zero no meio do vão, já o momento fletor é máximo no meio do vão. A Figura 21 representa um ensaio à flexão de 4 pontos, de modo que, nesse caso, o esforço cortante é zero entre as cargas concentradas. Portanto, diversos pesquisadores adotam o ensaio de 4 pontos em seus experimentos para o estudo de flexão em vigas, como Pimentel *et al* (2016), Higaki, Ribeiro e Cherem (2017), e, Lima (2021).

Figura 19 – Diagrama de esforço cortante e momento fletor com carregamento distribuído



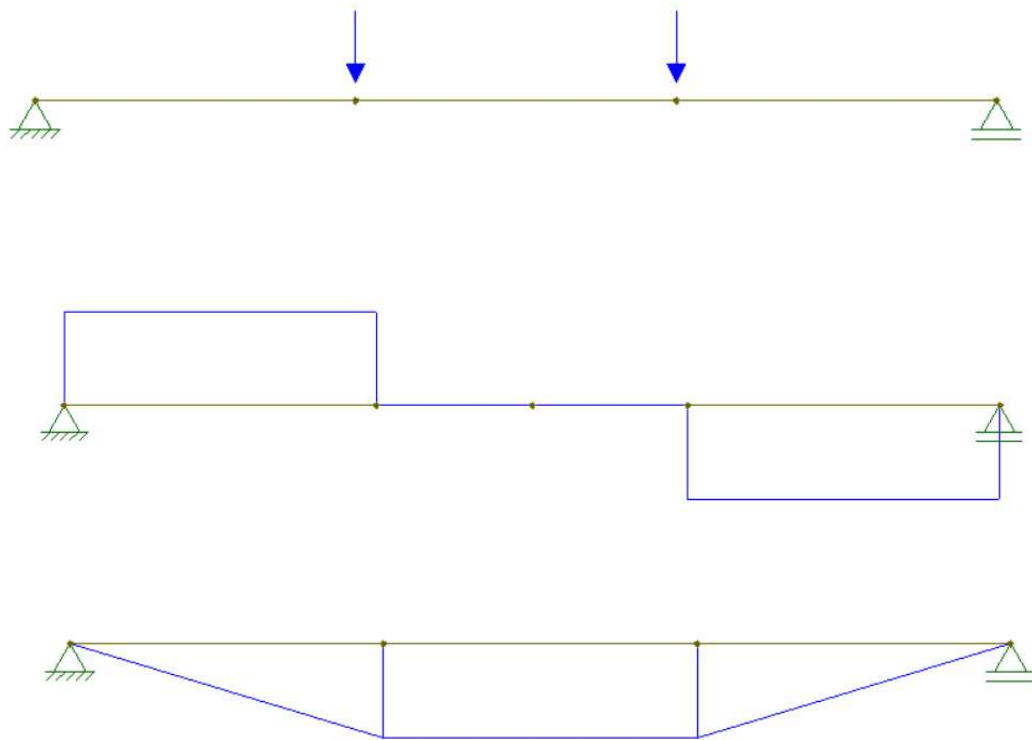
Fonte: Autor (2025)

Figura 20: Diagrama de esforço cortante e momento fletor em 3 pontos



Fonte: Autor (2025)

Figura 21: Diagrama de esforço cortante e momento fletor em 4 pontos



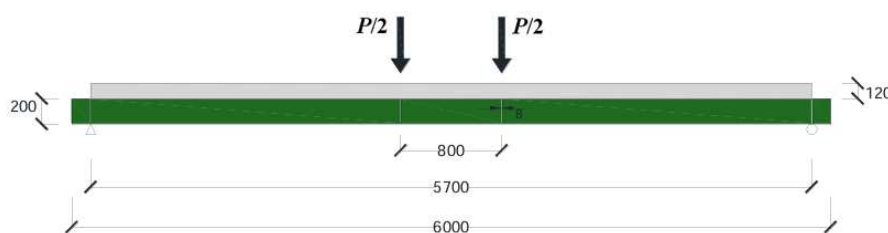
Fonte: Autor (2025)

## 2.6 Programa experimental realizado por Lima (2021)

O programa experimental desenvolvido por Lima (2021) consistiu na realização do ensaio à flexão de três vigas mistas aço-concreto biapoiadas, cuja conexão entre o elemento de concreto e aço foi realizada por meio de conectores de cisalhamento treliçados. Dessa forma, o que diferencia essas vigas, identificadas como, VCT-01, VCT-02 e VCT-03 está no grau de conexão, definido a partir do somatório das resistências dos conectores ao cisalhamento e da resistência mínima necessária para garantir conexão ao conector. Logo, a viga VCT-01 contém grau de conexão igual a 1, possuindo 20 conectores distribuídos ao longo da seção longitudinal da estrutura, sendo esta a viga selecionada para o estudo.

Nos modelos experimentais de Lima (2021), foi adotado um vão total de 6000 mm, com um vão livre de 5700 mm, de modo que, a laje de concreto apresenta 120 mm de espessura apoiada sobre um perfil de aço em formato I, com altura de 200 mm. Essa configuração atende às recomendações da norma EN 1994 1-1:2004, que estabelece que a razão entre o vão e a altura total da viga mista não deve exceder 20. Dessa forma, o carregamento foi aplicado em dois pontos centrais da viga, distanciados por 800 mm, conforme pode ser observado na Figura 22.

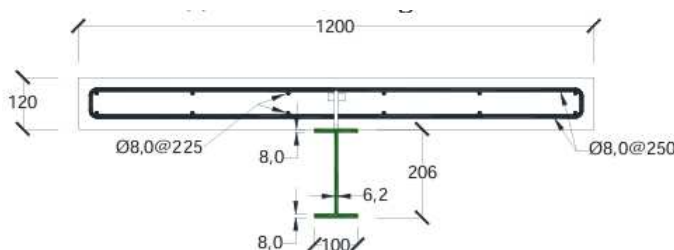
Figura 22: Viga mista submetida à flexão



Fonte: Lima (2021)

A seção transversal do perfil de aço é do tipo W200x22,5, fabricado pela ASTM A 572 Grau 50, ou seja, com 200 mm de altura e 22,5 quilos a cada metro linear. A armadura transversal da laje foi constituída por barras de 8 mm de diâmetro dispostas a cada 250 mm de distância, enquanto a armadura longitudinal é formada por 12 barras de 8 mm de diâmetro, de modo que 6 barras estavam dispostas na parte superior e 6 barras na parte inferior. Além disso, a resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) é de 30 Mpa. Dessa forma, a Figura 23 representa a geometria transversal do modelo experimental apresentado.

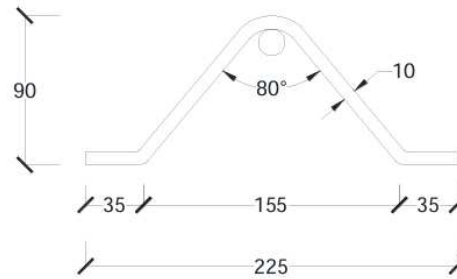
Figura 23 – Geometria transversal do modelo



Fonte: Lima (2021)

Quanto aos conectores de cisalhamento treliçado, utilizou-se nos modelos experimentais, um diâmetro de 10 mm, com altura de 90 mm e ângulo entre as hastes de 80 mm, configuração definida a partir da análise do ensaio numérico *Push -Out*. Além disso, manteve-se o pino horizontal, com de 16 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento, cuja função é contribuir no combate ao efeito do *uplift*. Logo, a configuração geométrica do conector pode ser analisada na Figura 24.

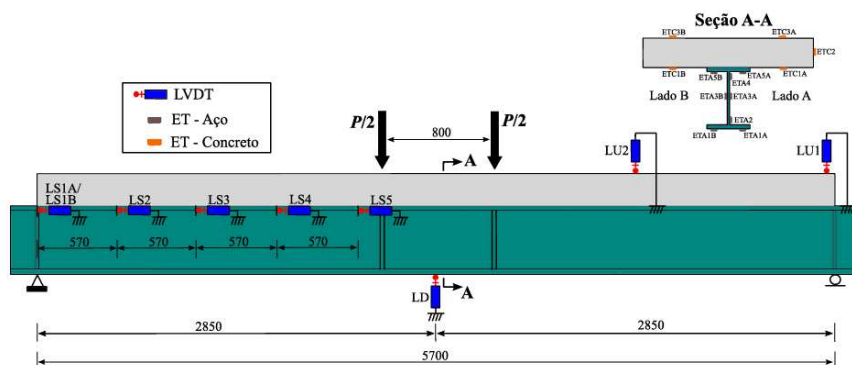
Figura 24 – Geometria do conector de cisalhamento treliçado



Fonte: Lima (2021)

No contexto do dimensionamento de vigas mistas aço-concreto, normas como a ABNT NBR 8800:2024 e o Eurocode 4 - EN 1994-1-1:2004, destacam a necessidade de verificação tanto de estados limites últimos quanto de serviço, onde se incluem deformações, flechas e comportamento da interface aço-concreto. Em concordância com essas normativas, este trabalho experimental adotou instrumentação capaz de mensurar, durante o ensaio, a deflexão, ou seja, deslocamento no meio do vão da viga, escorregamento relativo (*slip*) e *uplift* ao longo da interface aço-concreto e as deformações locais na seção central. Para isso, foram utilizados LVDT's para capturar os deslocamentos lineares, como a deflexão no meio da viga, *slip* e *uplift* e Extensômetros, de modo a medir as deformações na viga no vão central. Dessa forma, os LVDT's para medir o *slip* (LS1A, LS1B, LS2, LS3, LS4 e LS5) foram posicionados ao longo da viga, distribuídos do centro em direção à extremidade esquerda. O *uplift* foi monitorado na metade oposta da viga, por meio dos LU1 e LU2. Já os deslocamentos verticais no meio do vão foram obtidos a partir do LVDT identificado como LD. Esta representação pode ser visualizada na Figura 25.

Figura 25 – Localização dos LVDT's e Extensômetros



Fonte: Lima (2021)

## 2.7 Estudos experimentais e numéricos de vigas mistas com conectores de cisalhamento treliçado

Bezerra *et al.* (2018) apresentaram o desenvolvimento e avaliação do conector de cisalhamento treliçado como alternativa do conector tradicional *stud bolt*. O trabalho consistiu em ensaios experimentais *push-out* comparando-se conectores treliçados de 12,5 mm de diâmetro com o conector *stud bolt* de 19 mm de diâmetro. Foram analisados a resistência ao cisalhamento, *slip* e *uplift* e a ductibilidade dos conectores. Os resultados experimentais mostraram que o conector treliçado apresenta maior resistência ao cisalhamento e bom comportamento dúctil, assim como o *stud bolt*. Além disso, foi desenvolvido um modelo numérico em elementos finitos, validado com os resultados experimentais, que permitiu uma análise detalhada da distribuição de tensões e mecanismos de ruptura na laje de concreto e conector de cisalhamento. Portanto, o estudo conclui que o conector treliçado apresenta desempenho satisfatório e constitui como alternativa viável aos conectores *stud bolt*.

Barbosa *et al.* (2019) desenvolveram um estudo experimental focado no desenvolvimento do conector de cisalhamento treliçado reto para avaliar a possibilidade de uso no campo de estruturas mistas aço-concreto. Dessa forma, foram construídos 6 modelos experimentais, de modo que, representam o ensaio *push-out*, porém, sendo 3 ensaios com conectores treliçados de 12,5 mm de diâmetro e 3 conectores *stud bolt* com 19 mm de diâmetro. Desse modo, o objetivo é avaliar a capacidade resistente de ambos os conectores. Portanto, os resultados das análises experimentais mostram que o conector treliçado reto apresenta vantagens em relação ao conector *stud bolt* no que diz respeito a capacidade resistente. A Figura 26 ilustra os resultados experimentais referentes ao *stud bolt*, nomeados como SR e ao conector treliçado reto, descritos como R12,5.

Figura 26: Comparação dos resultados experimentais

| Modelo  | $P_{\max}$ total<br>(kN) | $P_{\text{med}}$ total<br>(kN) |
|---------|--------------------------|--------------------------------|
| SR19-1  | 920,80                   | 997,00                         |
| SR19-2  | 1010,20                  |                                |
| SR19-3  | 1060,00                  |                                |
| R12,5-1 | 1290,20                  | 1384,07                        |
| R12,5-2 | 1347,20                  |                                |
| R12,5-3 | 1514,80                  |                                |

Fonte: Barbosa *et al.* (2019)

Lima *et al.* (2020) estudaram o comportamento do conector de cisalhamento treliçado isósceles em vigas mistas aço-concreto. Desse modo, foi realizado o ensaio *push-out* numérico, validado de acordo com o ensaio experimental de Barbosa (2016). Além disso, foi feito um estudo paramétrico para obter as melhores dimensões dos conectores treliçado, no qual, variou a altura, o ângulo entre as hastes, o diâmetro dos conectores e a resistência do concreto. Os resultados indicam que os conectores apresentam bom desempenho estrutural, com adequada resistência ao cisalhamento. A Figura 27 representa os resultados da variação paramétrica obtidos pelos autores.

Figura 27 – Resultado da variação paramétrica realizada por Lima *et al.* (2020)

| TT connector                                                                        | $f_{cm}$ (MPa) | $Q_{FEA}$ (kN) | $Q_{Eq. (20)}$ (kN) | $Q_{FEA}/Q_{Eq. (20)}$ | Error (%) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|---------------------|------------------------|-----------|
| TT-8-H90-ANG80                                                                      | 25             | 67.00          | 55.30               | 1.212                  | 17.46     |
|                                                                                     | 30             | 67.39          | 62.85               | 1.072                  | 6.74      |
|                                                                                     | 35             | 68.68          | 70.11               | 0.980                  | -2.08     |
| TT-10-H90-ANG80                                                                     | 25             | 92.73          | 86.40               | 1.073                  | 6.83      |
|                                                                                     | 30             | 95.45          | 98.21               | 0.972                  | -2.89     |
|                                                                                     | 35             | 96.11          | 109.55              | 0.877                  | -13.98    |
| TT-12.5-H90-ANG80                                                                   | 25             | 128.20         | 134.00              | 0.967                  | -4.52     |
|                                                                                     | 30             | 163.02         | 153.45              | 1.062                  | 5.87      |
|                                                                                     | 35             | 170.49         | 171.17              | 0.996                  | -0.40     |
| Mean                                                                                |                |                |                     | 1.022                  |           |
| Coefficient of variation (CV)                                                       |                |                |                     | 0.093                  |           |
| Note: $Error (\%) = 100 \times \left\{ (Q_{FEA} - Q_{Eq. (20)}) / Q_{FEA} \right\}$ |                |                |                     |                        |           |

Fonte: Lima *et al.* (2020)

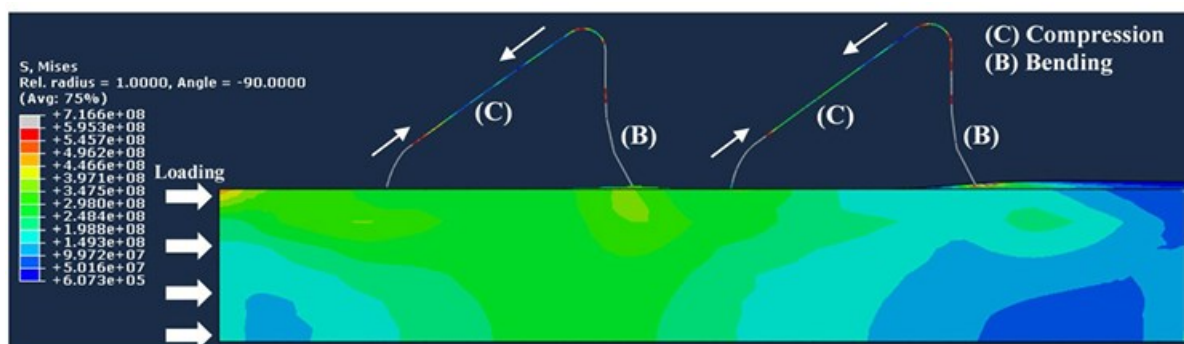
Lima *et al.* (2022) realizaram um estudo numérico sobre o conector de cisalhamento treliçado em ângulo reto por meio do ensaio *push-out*. O trabalho teve como objetivo avaliar a resistência do conector, de modo que, foi considerado a variação de parâmetros inerentes às ligações da viga mista aço-concreto como o diâmetro do conector e resistência do concreto, além de ser analisada a orientação de aplicação deste conector. O modelo foi validado de acordo com ensaios experimentais presentes na literatura, no qual, foi utilizado o software Abaqus para a modelagem e estudo numérico, sendo realizado um modelo tridimensional não linear de elementos finitos. Dessa forma, constatou-se que a capacidade de resistência deste conector é superior à do conector *stud bolt*.

Sousa (2022) realizou um estudo experimental para avaliar o desempenho de conectores de cisalhamento treliçado, de acordo com o ensaio *push-out*. O trabalho foi composto por sete modelos, nos quais variou-se o diâmetro das barras e a inclinação dos conectores em relação à mesa do perfil metálico. Desse modo, foram avaliados parâmetros

como carga de ruptura, deslizamento relativo aço-concreto e a separação transversal das lajes e perfil metálico. Os resultados mostram que os conectores com maiores diâmetros apresentam desempenho estrutural maior, sendo destaque o modelo com conector de 12,5 mm de diâmetro.

Moura *et al.* (2024) desenvolveu e validou uma metodologia numérica de baixo custo computacional, por meio de método dos elementos finitos. O estudo apresenta o objetivo de validar o modelo numérico *push-out* com conector de cisalhamento treliçado reto de geometria linear e realizar uma variação paramétrica, referente à altura do conector. Dessa forma, o modelo numérico foi validado por meio da comparação com resultados experimentais disponíveis na literatura. Após validação do modelo, foi feita uma variação na altura do conector, de modo que, variou para 90, 110, 130 e 150 mm de altura. Os resultados mostram que o modelo proposto é eficiente com um custo computacional e que o conector tem um alto potencial de ser aplicado em estruturas mistas, sendo o conector de 150 mm de altura apresentando maior capacidade resistente. A Figura 28 apresenta a distribuição de tensões nos elementos de aço no momento da carga última.

Figura 28 – Distribuição de tensões nos elementos de aço

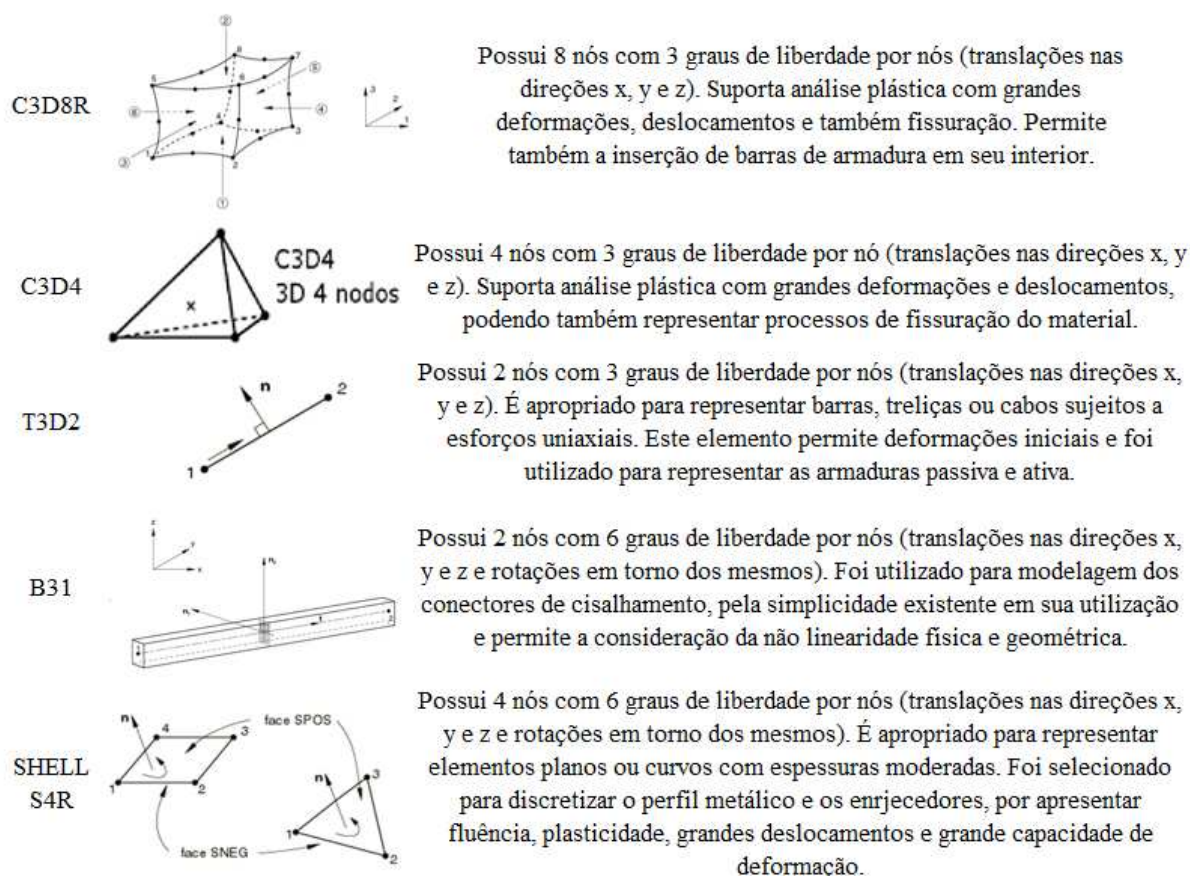


Fonte: Moura *et al.* (2024)

## 2.8 Principais tipos de Elemento Finitos

A Figura 29 representa e descreve os tipos de Elementos Finitos mais utilizados na modelagem numérica. Esses elementos diferenciam-se pela geometria, número de nós e graus de liberdade, fatores que influenciam diretamente na precisão dos resultados e no custo computacional da modelagem numérica. Dessa forma, a escolha correta do tipo de elemento finito é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados numéricos.

Figura 29: Tipos mais utilizados de Elementos Finitos

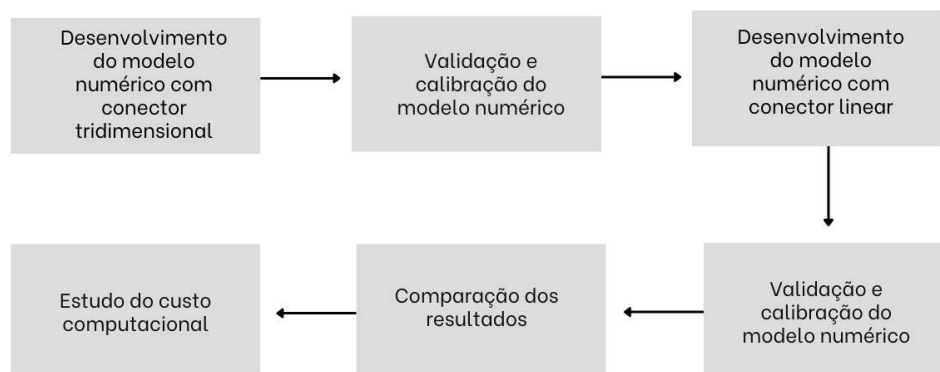


Fonte: Souza e Silva (2019) - Modificado

### 3 METODOLOGIA

A metodologia do referido trabalho fundamenta-se na realização de uma modelagem numérica de um sistema estrutural de viga mista aço-concreto e sua subsequente validação, a partir de ensaios experimentais à flexão realizados por Lima (2021). Além disso, ainda consiste na comparação entre os resultados obtidos a partir de duas abordagens distintas do conector de cisalhamento treliçado, de modo que, a primeira considera o conector em sua forma tridimensional, caracterizado como um elemento sólido; já a segunda retrata a representação simplificada por meio de elemento de viga, ou seja, uma modelagem linear do conector de cisalhamento treliçado. Dessa forma, a metodologia do presente trabalho está representada no fluxograma da Figura 30.

Figura 30 – Metodologia do presente trabalho



Fonte: Autor (2025)

A modelagem numérica foi realizada no software Abaqus, de modo que seguiu rigorosamente os procedimentos e passos para a representação real dos materiais, como geometria, propriedades dos materiais, condições de contorno, interação de contato, restrições, e peso próprio. A primeira etapa consistiu no desenvolvimento do modelo numérico com conector de cisalhamento treliçado com configuração 3D, de modo que, seguiu-se as etapas crescentes dispostas no software, ou seja, seguiu-se a ordem de modelagem descrita no programa. Após a construção deste modelo numérico, procedeu-se à etapa de validação e calibração, no qual, essa etapa envolveu ajustes nos parâmetros do modelo, como o tamanho da malha de elementos finitos no perfil metálico da viga mista.

Após a validação e calibração do modelo numérico com conector 3D, seguiu-se para a modelagem com conector linear, de modo que, os conectores de cisalhamento foram modelados de forma simplificada. Desse modo, assim como o modelo 3D, esse modelo também passou pelo processo de validação e calibração, de modo a garantir a simplificação do modelo numérico. Posteriormente, realizou-se a comparação entre os resultados experimentais realizados por Lima (2021) e os dois modelos numéricos, com conector 3D e linear, no qual, foi comparada a curva carga (kN) x deslocamento (mm) de ambos os resultados. Por fim, foi conduzido um estudo comparativo do custo computacional de ambos os modelos numéricos, de modo a avaliar o tempo de processamento do modelo numérico.

#### 4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO

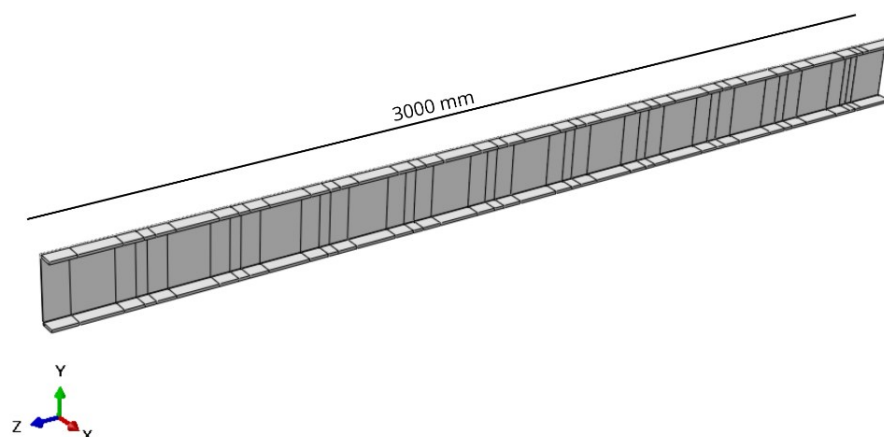
Este tópico apresenta detalhadamente o processo de modelagem dos dois tipos de vigas mistas VCT-01 no software Abaqus, que tem o objetivo de comparar as diferentes abordagens da representação do conector de cisalhamento treliçado. Dessa forma, a modelagem do conector de cisalhamento é realizada de duas formas distintas: como elemento finito tridimensional sólido e como elemento de viga, caracterizado por seu formato linear. Cada abordagem proporciona uma forma diferente de representar a interação entre os materiais e o comportamento estrutural da viga mista.

#### 4.1 Geometria do modelo numérico

No módulo *Part* são definidas as geometrias de cada componente da viga mista aço-concreto, compreendendo o perfil metálico, a laje de concreto, as armações longitudinais e transversais da laje e o conector de cisalhamento treliçado. Vale ressaltar que o ensaio numérico foi desenvolvido a partir da modelagem de apenas um quarto do ensaio experimental, adotando-se condições de simetria em relação aos eixos X e Z. A utilização da simetria reduz significativamente o número de elementos finitos e, consequentemente, o tempo de processamento, otimizando o desempenho computacional sem comprometer a precisão real da análise numérica detalhada. Dessa forma, autores como Sousa *et al.* (2024), Moura (2024), Lima *et al.* (2020) e Souza e Silva (2018) também realizaram a modelagem numérica no Abaqus com um quarto do modelo experimental e obtiveram resultados satisfatórios.

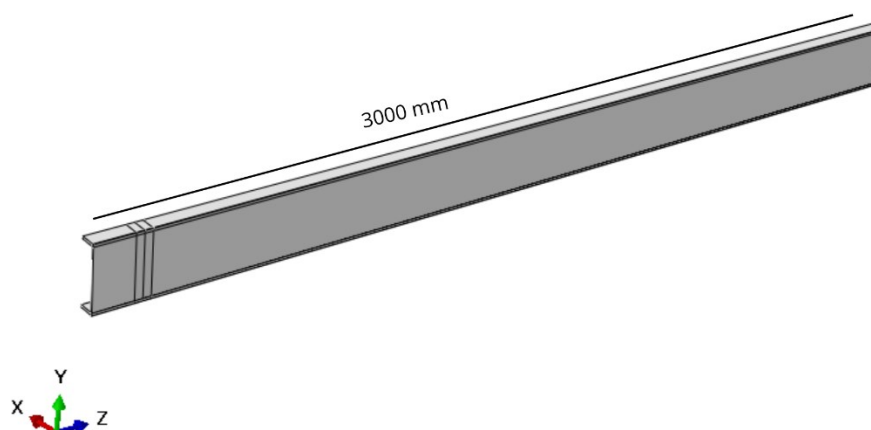
Conforme ilustrado nas Figuras 31, 32, 33 e 34, descrevem-se, inicialmente, as dimensões do perfil metálico e da laje de concreto armado. O perfil de aço corresponde ao tipo W200x15,00, de modo que, apresenta comprimento total de 3000 mm, 200 mm de altura, 3,1 mm de espessura da alma e 50 mm de largura da mesa. Já a laje de concreto apresenta 2850 mm de comprimento, 600 mm de largura e 120 mm de espessura. A Figura 31 representa o perfil metálico para o modelo numérico com conector tridimensional, que possui várias partições para permitir o encaixe dos conectores de cisalhamento e o refinamento da malha de elementos finitos na região das hastes do conector. A Figura 32 apresenta o perfil metálico com conector linear, de modo que, apresenta menos partições no perfil metálico, pois como o conector é um elemento mais simplificado considerado embutido na laje de concreto, logo o perfil metálico não necessitou de várias partições e, consequentemente, refinamento.

Figura 31 – Perfil de aço do modelo numérico com conector 3D



Fonte: Autor (2025)

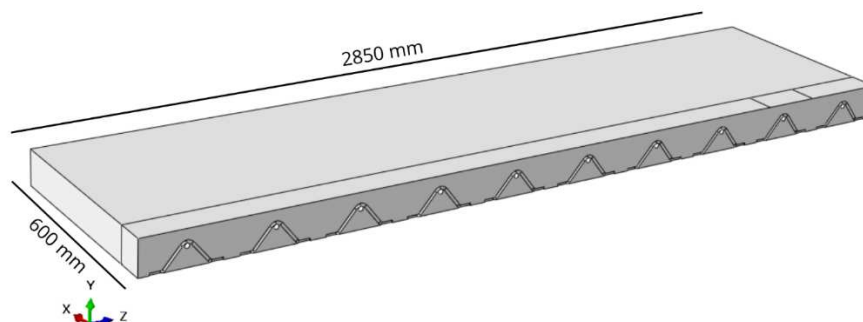
Figura 32 – Perfil de aço do modelo numérico com conector linear



Fonte: Autor (2025)

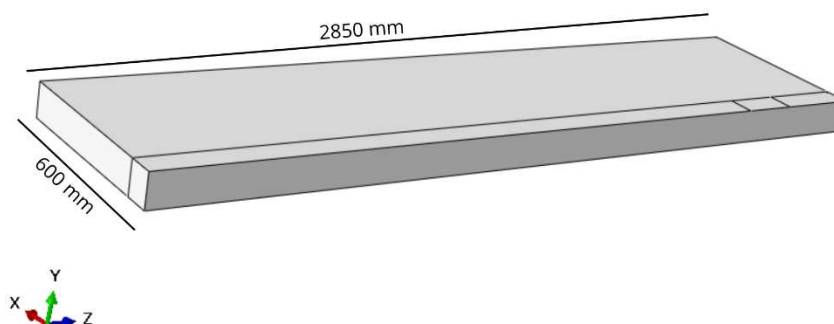
A Figura 33 representa a laje de concreto modelada para o modelo numérico com conector tridimensional. Dessa forma, percebe-se cortes na região da laje com formato do conector. Além disso, foi feita uma partição na região longitudinal para refinamento da malha de elementos finitos. Outra partição foi feita para poder ser aplicado o deslocamento de 80 mm. A Figura 34 apresenta a laje de concreto para o modelo com conector linear. Percebe-se que não temos o corte do conector na região da laje, pois considera que o conector está embutido na laje de concreto. Porém, mantém com a partição longitudinal para a definição da região da interação entre a laje de concreto e o perfil metálico.

Figura 33 – Laje de concreto do modelo numérico com conector 3D



Fonte: Autor (2025)

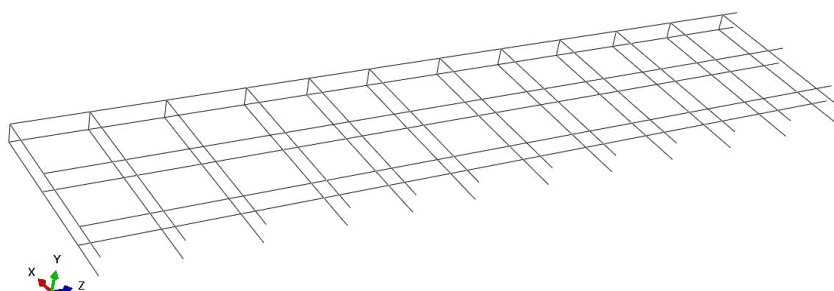
Figura 34 – Laje de concreto do modelo numérico com conector linear



Fonte: Autor (2025)

A armadura da laje apresenta diâmetro de 10 mm, de modo que, foi definida com base em sua distribuição transversal e longitudinal, conforme ilustrado na Figura 35. A armadura transversal é composta por barras espaçadas a cada 250 mm no sentido horizontal e 62 mm no sentido vertical, totalizando 12 barras na região inferior e 12 barras na região superior. Já a armadura longitudinal é formada por 6 barras, sendo 3 posicionadas na parte inferior e 3 na parte superior, com espaçamento horizontal de 270 mm e vertical de 62 mm.

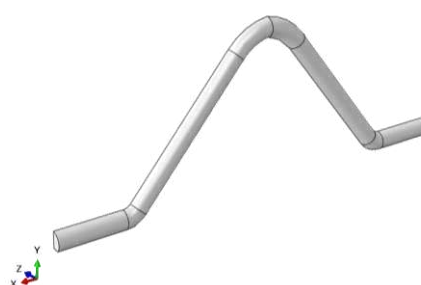
Figura 35 – Armadura utilizada para ambos os modelos



Fonte: Autor (2025)

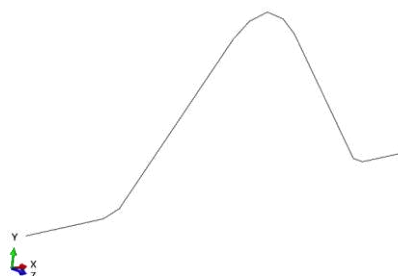
A configuração geométrica do conector de cisalhamento treliçado segue duas versões distintas, conforme o tipo de modelagem adotado. Na primeira versão, o conector modelado é representado como elemento homogêneo, 3D, com diâmetro de 10 mm. Na segunda versão, o conector modelado como elemento de viga. Em ambas as configurações, o conector apresenta altura total de 90 mm, ângulo de abertura entre as hastes de 80° e comprimento de cada haste de 35 mm. A ilustração das duas versões pode ser visualizada nas Figuras 36 e 37.

Figura 36 – Conector de cisalhamento treliçado 3D



Fonte: Autor (2025)

Figura 37 – Conector de cisalhamento treliçado linear



Fonte: Autor (2025)

## 4.2 Propriedades dos materiais

Na Tabela 1 estão descritos os módulos de elasticidades ( $E$ ), as tensões de escoamento ( $\sigma_y$ ) e última ( $\sigma_u$ ), as deformações de escoamento ( $\epsilon_y$ ) e última ( $\epsilon_u$ ) e o valor de Poisson utilizado no modelo numérico referente ao aço estrutura, referente ao conector treliçado, perfil metálico e armadura da laje de concreto. Para as propriedades plásticas do aço, foi utilizado o modelo constitutivo PLASTIC, onde foi inserida a curva Tensão x Deformação bi linear do aço, disponível na biblioteca do Abaqus. Para o concreto, a densidade utilizada é de

2.500 kg/m<sup>3</sup>, coeficiente de Poisson 0,2, módulo de elasticidade 29,9764 GPa, resistência à compressão média de 39,58 MPa e resistência à tração por compressão média diametral de 3,36 MPa. No que diz respeito às propriedades plásticas do concreto, foi utilizado o modelo *concrete damaged plasticity*, como pode ser observado na Tabela 2 e nos Gráficos 1 e 2, referente aos parâmetros de plasticidade e curvas de compressão e tração. Para mais detalhes, ver Lima (2021).

Tabela 1: Propriedade dos aços

| Propriedades     | Conector | Perfil de aço | Armadura da laje |
|------------------|----------|---------------|------------------|
| E (GPa)          | 194,50   | 208,70        | 198,40           |
| $\sigma_y$ (MPa) | 591,60   | 367,02        | 561,20           |
| $\epsilon_y$ (%) | 0,304    | 0,176         | 0,283            |
| $\sigma_u$ (MPa) | 722,40   | 489,92        | 663,20           |
| $\epsilon_u$ (%) | 6        | 25,23         | 6                |
| Poisson          | 0,3      | 0,3           | 0,3              |

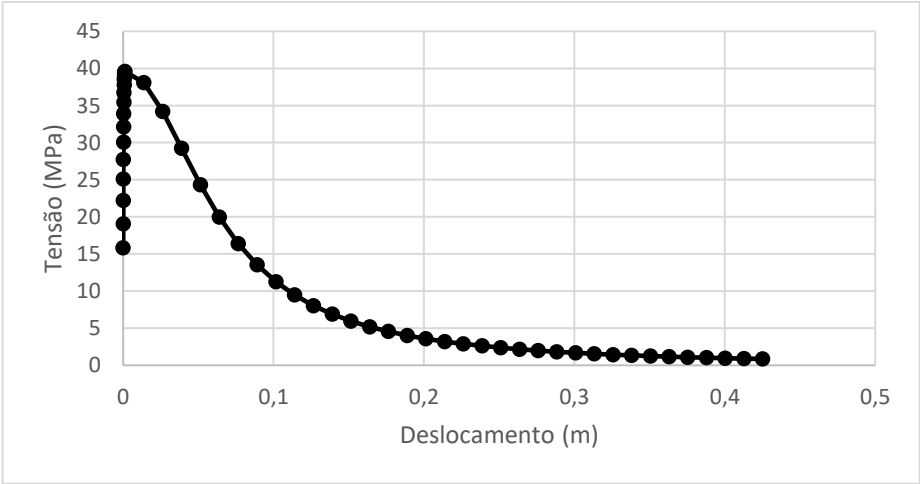
Fonte: Lima (2021)

Tabela 2: Parâmetros plásticos do concreto

| Dilation Angle | Eccentricity | fb0/fc0 | K   | Viscosity Parameter |
|----------------|--------------|---------|-----|---------------------|
| 13             | 0.1          | 1.16    | 0.7 | 0                   |

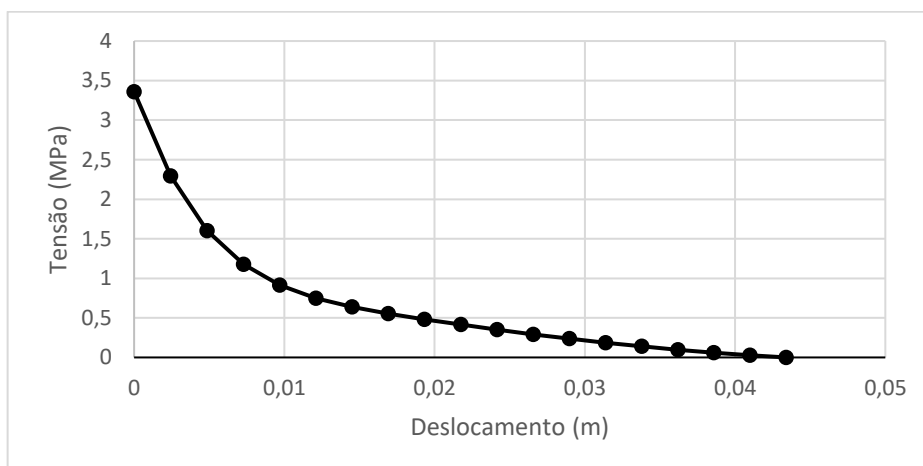
Fonte: Autor (2025)

Gráfico 1: Curva plástica de compressão do concreto



Fonte: Autor (2025)

Gráfico 2: Curva plástica de tração do concreto

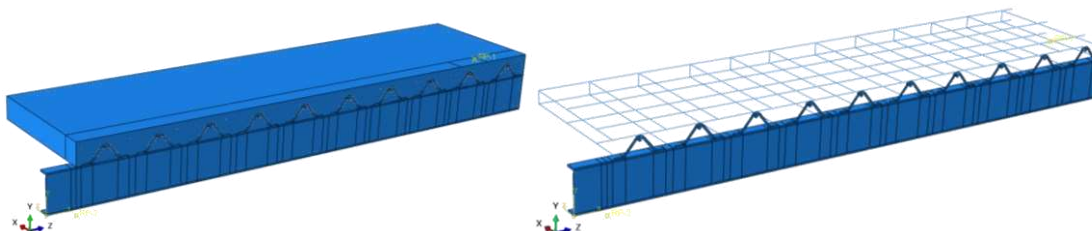


Fonte: Autor (2025)

### 4.3 União dos componentes do modelo

No módulo *Assembly* realizou-se a combinação dos elementos estruturais modelados em “Part”, com o intuito de representar a estrutura em sua configuração real. Dessa forma, no ponto de origem (0,0,0) temos o perfil metálico, sobre ele foi inserido a laje de concreto e, em seu interior, foram incorporadas as armaduras. Além disso, os conectores de cisalhamento treliçado também estão incorporados na laje de concreto e, de modo que, suas hastes estão fixas acima da mesa superior do perfil metálico, sendo distribuídos ao longo de sua seção longitudinal, com espaçamento definidos por Lima (2021). Nas Figuras 38 e 39 observa-se a ilustração dos elementos devidamente posicionados, seguindo a configuração geométrica do ensaio experimental. A Figura 38 (a) representa a combinação dos elementos estruturais com a laje de concreto, modelada com conector 3D, enquanto a Figura 38 (b) mostra a combinação dos elementos estruturais sem a laje de concreto, também modelada com conector 3D.

Figura 38 – Junção dos elementos estruturais com conector 3D



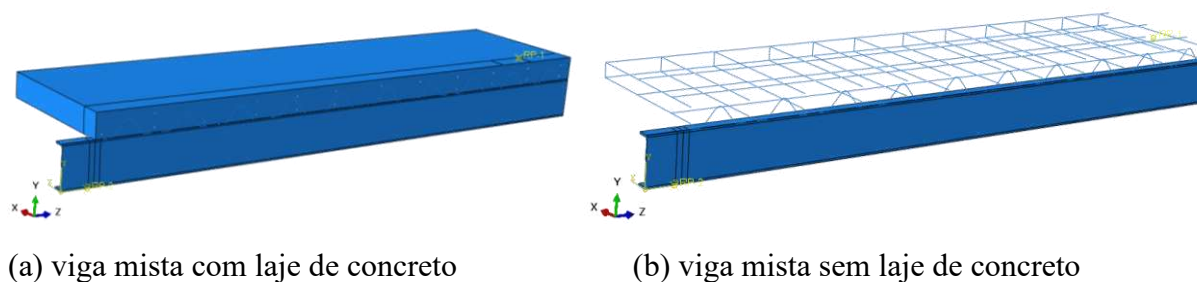
(a) viga mista com laje de concreto

(b) viga mista sem laje de concreto

Fonte: Autor (2025)

A Figura 39 (a) representa a combinação dos elementos estruturais com a laje de concreto, modelada com conector linear, enquanto a Figura 39 (b) mostra a combinação dos elementos estruturais sem a laje de concreto, também modelada com conector linear.

Figura 39 – Junção dos elementos estruturais com conector linear



Fonte: Autor (2025)

#### 4.4 Método de análise

Na aba *Step* do Abaqus, adotou-se o método *Dynamic Explicit* que simula eventos dinâmicos com comportamento não linear e converge com maior eficiência quanto ao dano do material. Embora seja um método dinâmico, pode ser aplicado em modelos estáticos, desde que os efeitos de inércia sejam controlados com aplicação lenta de carga ou deslocamento (Lima, 2018), como é o caso da viga mista de estudo. Desse modo, trata-se de um método de análise apropriado para modelos que envolvem deformações elevadas, danos de material e a Não Linearidade Geométrica (Abaqus, 2014).

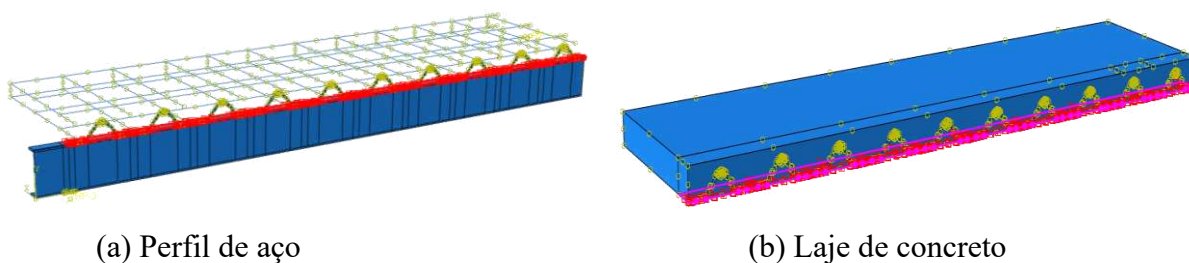
#### 4.5 Interações de contato e restrições

A seguir serão apresentadas as interações de contato e restrições dos modelos numéricos do presente estudo. Em ambos os modelos foram utilizadas as mesmas interações de contato. Contudo, adotou-se diferentes restrições entre o conector e a laje de concreto para o modelo 3D e linear. Logo, para melhor entendimento, os tópicos a seguir descrevem as interações de contato, as restrições comuns aplicadas a ambos os modelos e, por fim, as restrições específicas de cada modelo.

#### 4.5.1 Interações de contato

As interações de contato representam a forma como os elementos estruturais da viga mista aço-concreto interagem entre si quando simuladas seu comportamento. Logo, as interações de contato são essenciais para representar com precisão como as partes dos elementos estruturais de um modelo numérico interagem entre si, o que torna a simulação mais realista e fiel ao comportamento físico e mecânico da estrutura. Desse modo, na interface entre o perfil de aço e a laje de concreto, foi utilizado o tipo *surface-to-surface (explicit)*, ou seja, uma interação de contato da superfície do perfil metálico com a superfície da laje de concreto. Posteriormente, considerou-se o contato *normal behavior*, que impede a penetração entre as duas superfícies e o comportamento *tangencial frictionless*, que permite o deslizamento longitudinal na superfície. A Figura 40 mostra a superfície de contato aço-concreto utilizada para aplicação das interações de contato, no qual, foi utilizada tanto no modelo numérico com conector 3D quanto com conector linear.

Figura 40 – Superfícies de contato perfil de aço-laje de concreto

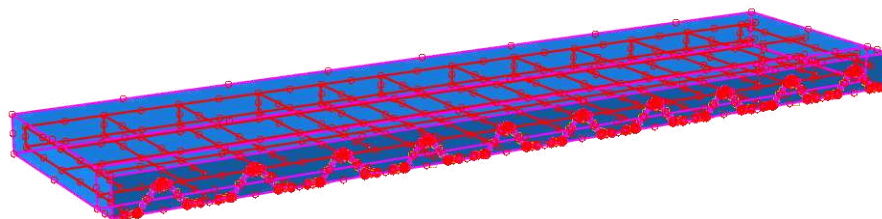


Fonte: Autor (2025)

#### 4.5.2 Restrições comuns em ambos os modelos numéricos

Restrições de deslocamentos servem para restringir um componente em relação a outro, ou seja, é uma condição imposta ao modelo para limitar ou controlar o deslocamento entre a superfície desejada. Dessa forma, foi aplicada o tipo de restrição *embedded region* entre a armadura e laje de concreto. Nesse tipo de interação, a armadura é considerada embutida dentro da laje de concreto, que funciona como região hospedeira. Logo, com essa definição, os nós da armadura não se movem independentemente, sendo que acompanham os deslocamentos da laje de concreto a seu redor. A Figura 41 ilustra esse tipo de restrição realizada no Abaqus.

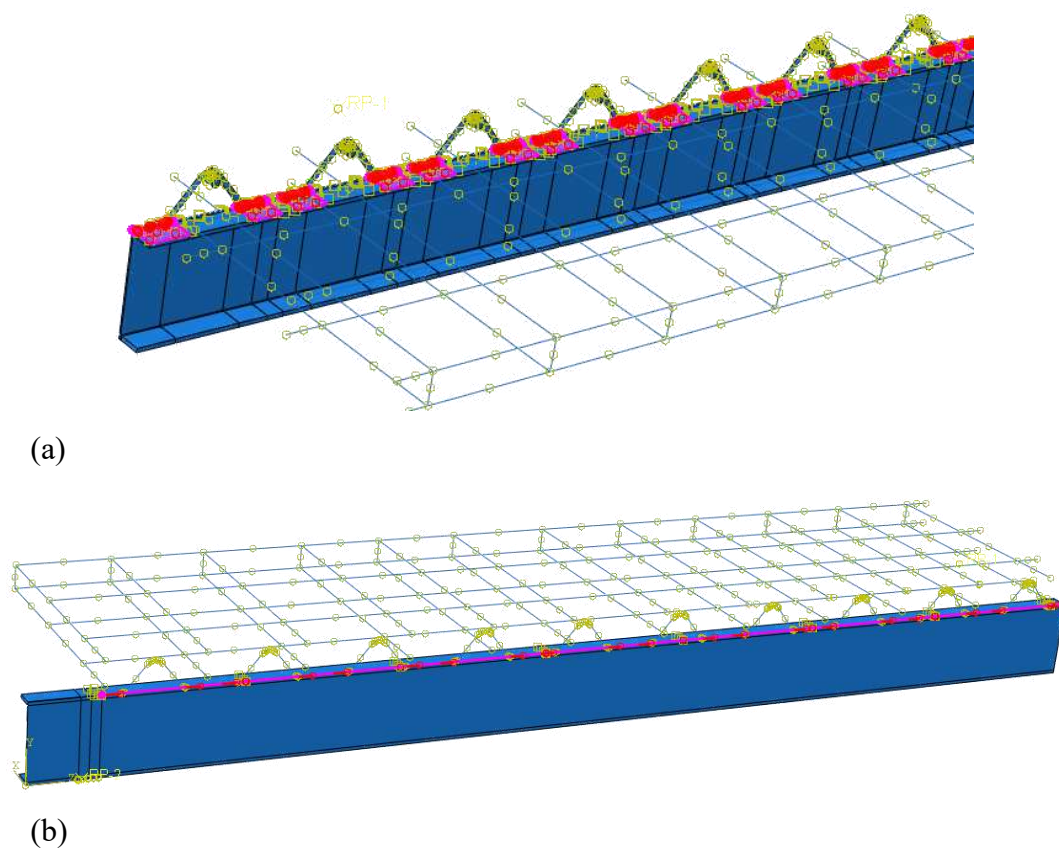
Figura 41 – Restrição entre armação e laje de concreto



Fonte: Autor (2025)

Além da restrição *embedded region* utilizada na armadura e laje de concreto, também considerou a restrição do tipo *tie*, de modo que é usada quando se deseja uma ligação perfeita, sem deslizamento entre as superfícies. Dessa forma, a restrição *tie* foi aplicada entre a superfície do conector de cisalhamento e o perfil metálico. A Figura 42 ilustra a superfície de contato entre o conector de cisalhamento e o perfil metálico, de modo que o item (a) mostra a região do modelo com conector 3D e o item (b) a região do modelo com conector linear.

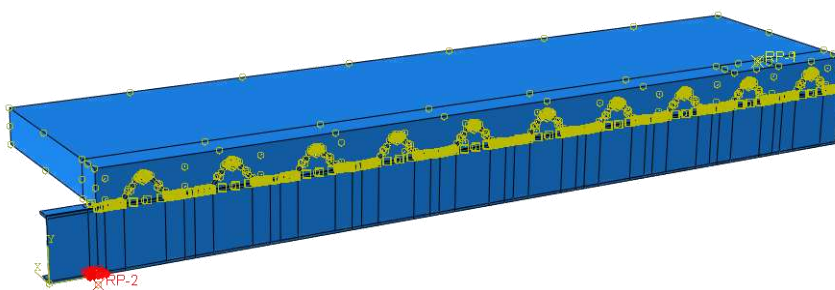
Figura 42 – Restrição *tie* entre o conector e perfil metálico



Fonte: Autor (2025)

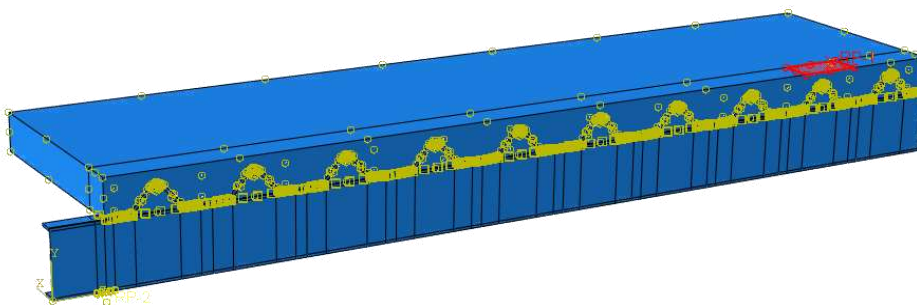
Foi aplicada a restrição *rigid body* na reação de apoio da viga mista e na região da laje de concreto onde foi aplicado o deslocamento de 80 mm. A restrição *rigid body* é usada para que a região selecionada seja interligada a um ponto de referência, no qual, neste ponto de referência serão aplicadas carregamentos, deslocamentos ou condições de contorno. A Figura 43 mostra a região, no perfil metálico, onde foi aplicada o *rigid body* para funcionar como apoio. A Figura 44 ilustra a região, na laje de concreto, onde foi aplicado o *rigid body* para ser aplicado o deslocamento obtido no ensaio experimental de Lima (2021).

Figura 43 – Reação de apoio



Fonte: Autor (2025)

Figura 44 – Região de aplicação do deslocamento

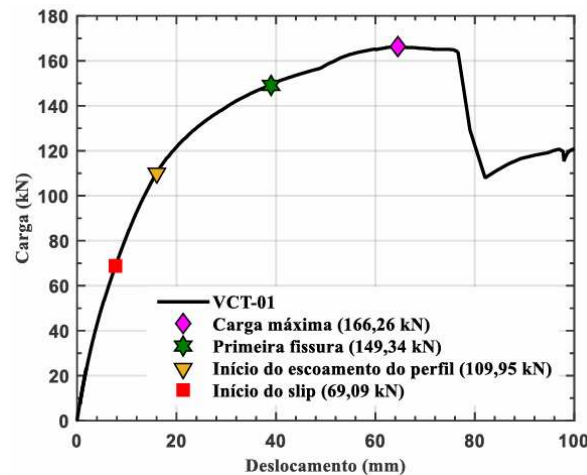


Fonte: Autor (2025)

Vale ressaltar que o valor do deslocamento vertical aplicado, como mostrado na Figura 45, é definido conforme Lima (2021), ou seja, a carga máxima suportada pela viga VCT-01 é de 166,26 kN, no qual, a viga obtém um deslocamento vertical de, aproximadamente, 80 mm. Portanto, foi aplicado um deslocamento de 80 mm no meio do vão com o intuito de verificar a carga relacionada a este deslocamento aplicado para validação do modelo numérico. Isso pode ser explicado pois o controle de deslocamento é considerado mais eficiente que o controle de carga quando se deseja analisar o comportamento não linear completo de uma

estrutura, além de necessitar de um menor custo computacional, conforme regido pela lei de Hooke.

Figura 45 – Curva carga x deslocamento da viga VCT-01 de Lima 2021



Fonte: Lima (2021)

Nesse contexto, ao inserir o deslocamento no software, o custo computacional é reduzido e os resultados tendem a convergir com maior facilidade, uma vez que não é necessário dividir a força pela rigidez para determinar o deslocamento, como ocorre na lei de Hooke.

$$f = k \cdot d$$

Onde:

$f$  é a força aplicada;

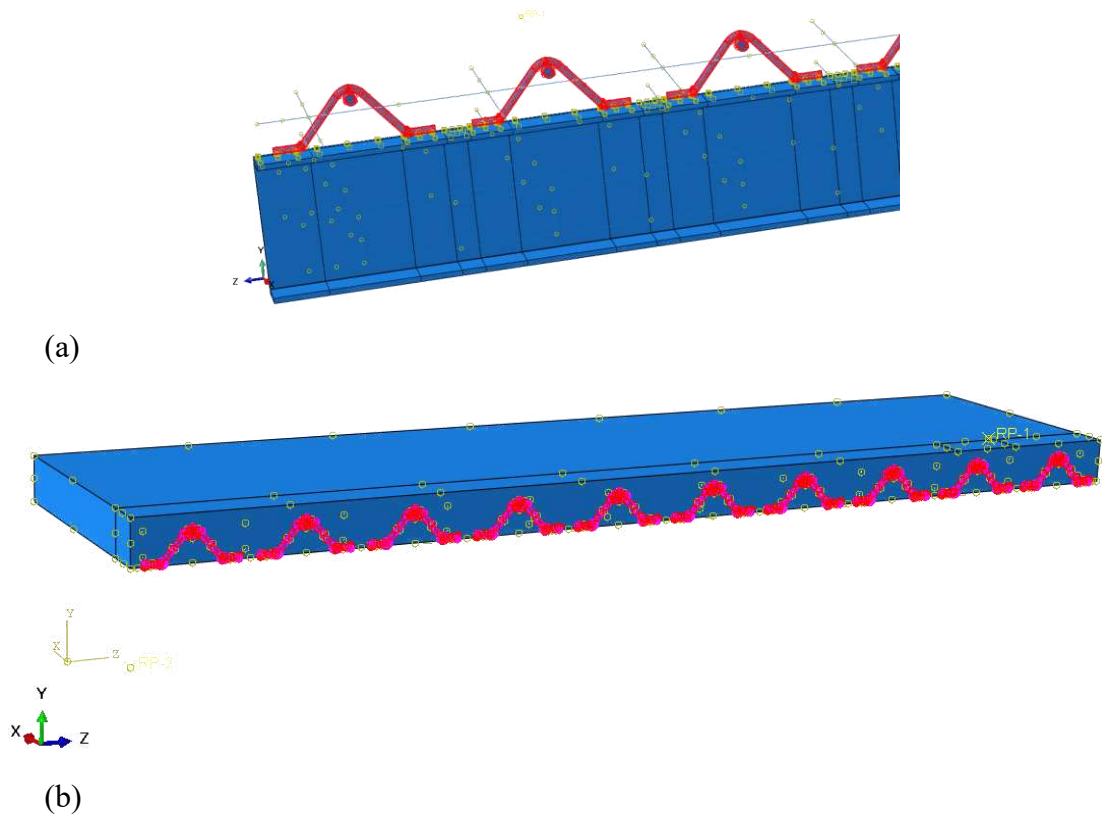
$k$  a matriz de rigidez da estrutura;

$d$  o deslocamento da estrutura.

#### 4.5.3 Restrição utilizada no modelo numérico com conector 3D

A restrição *tie* também foi aplicada entre a superfície do conector de cisalhamento e laje de concreto. A Figura 46 ilustra a superfície de contato entre o conector de cisalhamento e laje de concreto, de modo que o item (a) mostra a região do conector e o item (b) a região da laje de concreto.

Figura 46 – Restrição *tie* entre conector 3D e laje de concreto

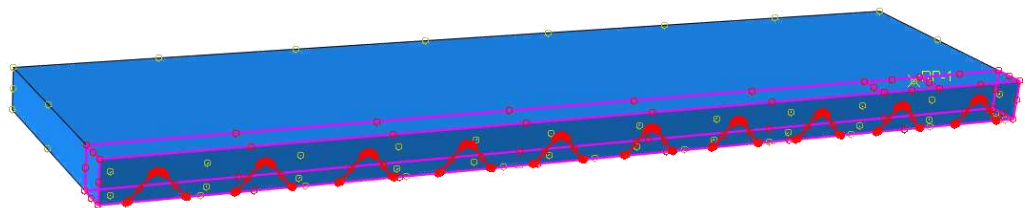


Fonte: Autor (2025)

#### 4.5.4 Restrição utilizada no modelo numérico com conector linear

A restrição entre o conector linear e a laje de concreto elementos é do tipo *embedded*, ou seja, o conector é embutido na laje de concreto. Isso ocorre porque o elemento linear não apresenta volume, o que facilita o processamento numérico. A Figura 47 apresenta, de forma, visual, a interação de contato nessa superfície.

Figura 47 – Superfície de contato do conector linear e laje de concreto

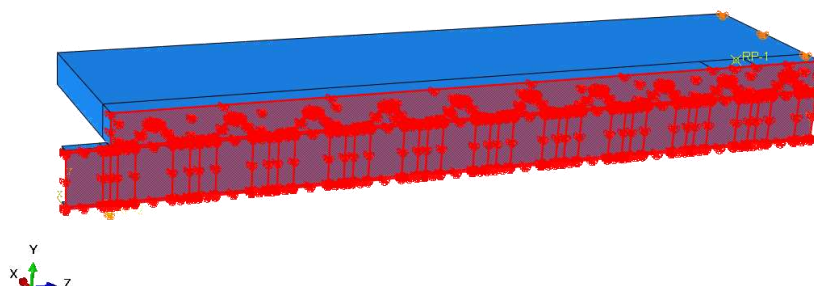


Fonte: Autor (2025)

#### 4.6 Condições de contorno e carregamento

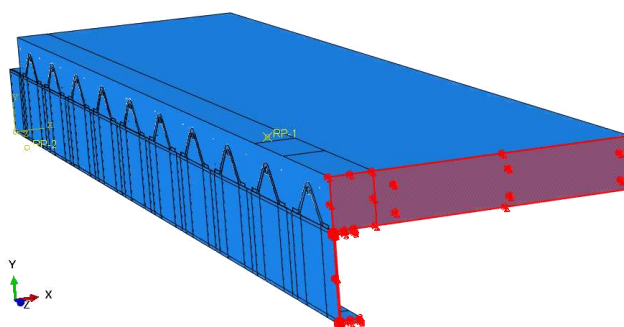
Na aba *Load* são aplicados os carregamentos, as condições de contorno e de simetria. O peso próprio considerado é da gravidade, sendo aplicado a todos os componentes estruturais na direção vertical do eixo *y* para baixo. Quanto às condições de contorno, como o modelo numérico representa um quarto da geometria experimental, são impostas condições de simetria para simular o comportamento real. Assim, na direção *x*, ou seja, na largura da viga mista, os deslocamentos nessa direção são impedidos, de modo a garantir o comportamento simétrico. A mesma lógica é aplicada na direção longitudinal, ou seja, direção *z*, onde também se restringem os deslocamentos correspondentes à simetria do modelo. Uma ilustração da restrição dos deslocamentos pode ser observada nas Figuras 48 e 49.

Figura 48 – Condições de simetria na direção longitudinal da viga mista



Fonte: Autor (2025)

Figura 49 – Condições de simetria na direção transversal da viga mista

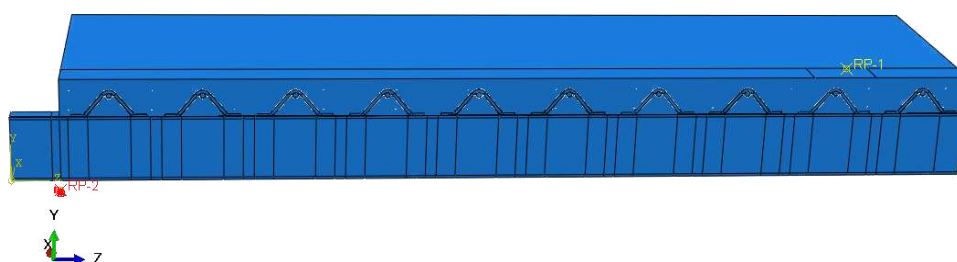


Fonte: Autor (2025)

Além disso, na região de apoio da viga mista, é restringido o deslocamento na direção *y*, deixando as direções *x* e *z* livres para deslocamentos e rotações. Quanto ao deslocamento aplicado, é tomado como base o valor o aproximado da viga VCT-01 estudada

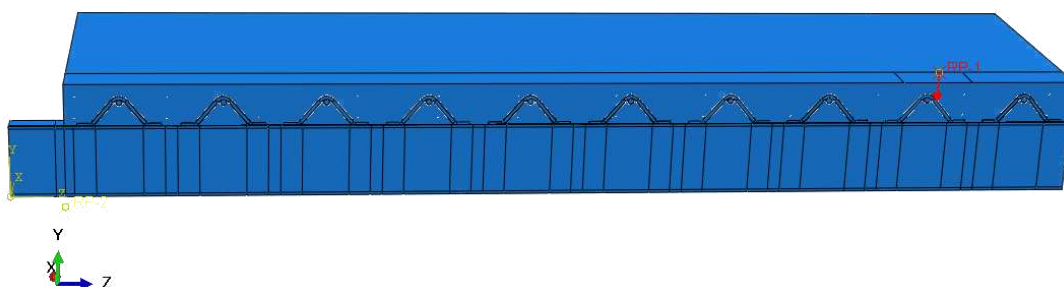
por Lima (2021), que corresponde a cerca de 80mm. Assim, esse deslocamento é imposto no meio do vão, o que permite que o modelo seja deformado até atingir esse valor. Esse procedimento é conhecido como controle de deslocamento, no qual, permite representar de forma mais convergente o comportamento estrutural garantindo que a simulação acompanhe a resposta real da viga até seu valor limite. Nas Figuras 50 e 51 é possível visualizar a região da viga onde é considerado o apoio e a região de aplicação do deslocamento.

Figura 50 – Região no perfil onde é o apoio



Fonte: Autor (2025)

Figura 51 – Aplicação do deslocamento no meio do vão



Fonte: Autor (2025)

#### 4.7 Malha e elementos finitos

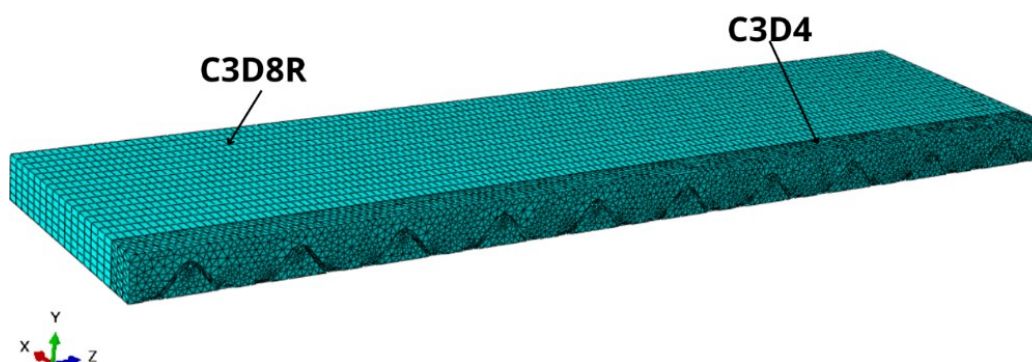
Malha de elementos finitos é a divisão de uma geometria contínua em pequenas partes chamadas de elementos, logo, em vez de resolver diretamente o problema físico complexo, o Método dos Elementos Finitos divide o domínio em elementos pequenos. Cada elemento tem a sua formulação matemática, de modo que, as equações matemáticas dependem do tipo de elemento finito utilizado na discretização do domínio. Cada elemento finito é formulado de maneira independente, de modo que, possui suas próprias equações e propriedades, sendo, posteriormente, conectadas pelos nós comuns, o que permite a montagem

do sistema global que representa o comportamento de todo o domínio. Vale mencionar que a qualidade da malha influencia diretamente a precisão e o custo computacional, ou seja, quanto menores os elementos, maior precisão e, consequentemente maior custo computacional.

#### 4.7.1 Laje de concreto com conector 3D

Na laje de concreto foram utilizadas duas malhas de elementos finitos diferentes, todas com elementos de 30mm, baseado no tamanho da malha de elementos finitos utilizada por Moura (2024), uma na região próxima ao conector e outra na região mais distantes. Na região mais distante do conector, foi utilizada uma malha com o elemento C3D8R por se tratar de um elemento com formato cúbico, sendo mais adequado para essa situação na laje, ou seja, tem geometria hexaédrica com 8 nós, de modo que, cada nó possui 3 graus de liberdade, sendo translações em x, y e z. Já a região próxima ao conector de cisalhamento foi malhada com elemento C3D4, de modo que, é um elemento tetraédrico com 4 nós e 3 graus de liberdade por nó, sendo translações em x, y e z. Logo, tem a vantagem de ser utilizado para malhas complexas, pois o elemento tetraédrico se ajusta facilmente à geometria solicitada. A Figura 52 representa a malha de elementos finitos utilizada para a laje de concreto.

Figura 52 – Malha da laje de concreto com conector 3D



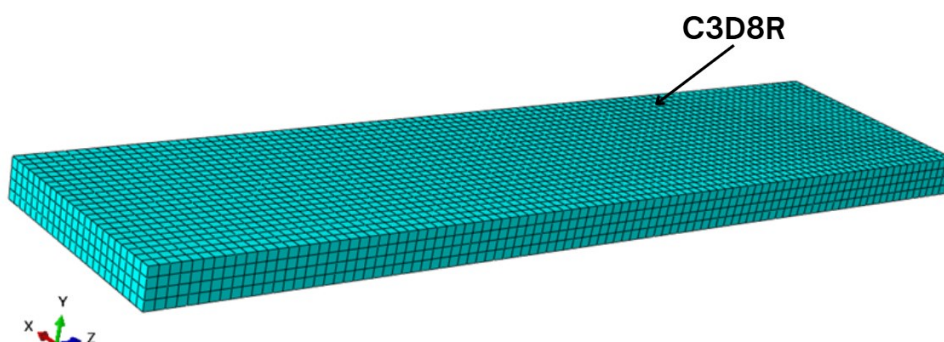
Fonte: Autor (2025)

#### 4.7.2 Laje de concreto com conector linear

O tamanho dos elementos finitos permaneceu de 30mm, porém, utilizou-se somente o elemento sólido C3D8R, pois como não foi necessário fazer o corte na laje de concreto devido ao fato de o conector ser linear, não houve partições e nem geometrias complexas que necessite de outro elemento finito, portanto, o elemento C3D8R mais adequado para esta situação. Esse

conceito reduz significativamente o custo computacional porque evita refinamento na região da malha, como na laje de concreto do modelo tridimensional do conector. Por outro lado, essa simplificação leva à perda de informações, como a distribuição de tensões na laje de concreto, pois como a malha não é refinada, o modelo não consegue capturar com todos os detalhes os gradientes de tensão. Dessa forma, a Figura 53 representa a malha de elementos finitos para este caso.

Figura 53 – Malha da laje de concreto com conector linear

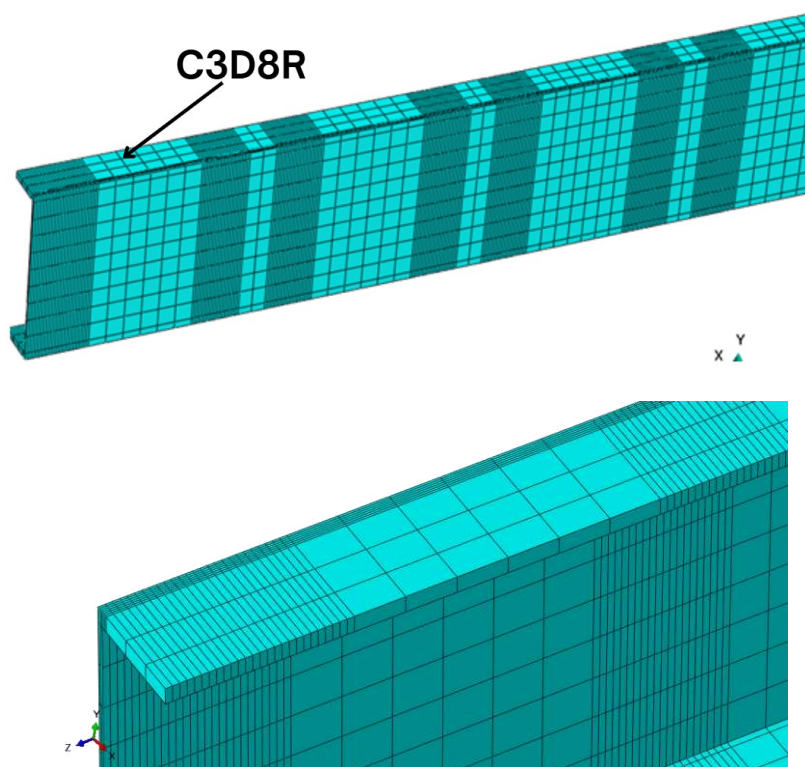


Fonte: Autor (2025)

#### 4.7.3 Perfil de aço com conector 3D

Para o perfil de aço, adotou-se uma malha com elementos C3D8R de 20 mm dimensão. Entretanto, nas regiões onde as hastes dos conectores conectam com o perfil de aço é necessário um refinamento para garantir maior precisão na determinação das tensões e deformações. Dessa forma, na mesa superior, foram definidos 3 elementos na direção vertical-longitudinal do perfil, e elementos conectores na região interceptada pelas hastes dos conectores. Na região transversal das hastes dos conectores, foram utilizados elementos de 3 mm de dimensões. A Figura 54 representa melhor a malha do perfil de aço e seu refinamento.

Figura 54 – Malha do perfil de aço com conector 3D

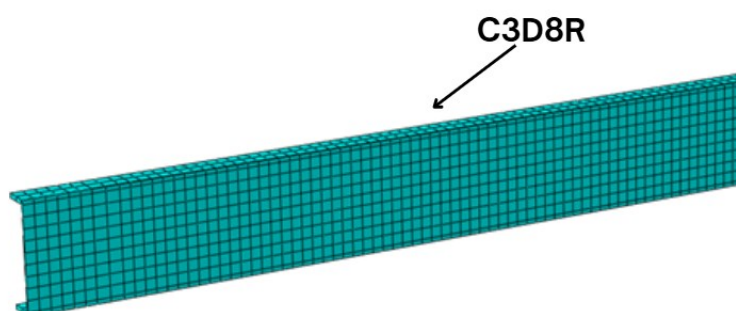


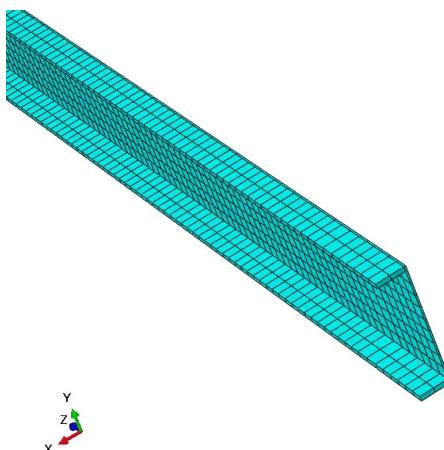
Fonte: Autor (2025)

#### 4.7.4 Perfil de aço com conector linear

O elemento adotado na discretização do modelo continuou sendo o C3D8R, com 20 mm de dimensões. Nesse caso, não foi necessário realizar o refinamento da malha no perfil, pois como o conector é linear, suas hastes não geram tensões e deformações significativas no perfil, o que desconsidera o refinamento. Logo, a escolha do elemento C3D8R sem refinamento é suficiente para reproduzir de maneira precisa o comportamento mecânico do perfil, o que mantém um baixo custo computacional. A Figura 55 retrata a malha do perfil de aço.

Figura 55 – Malha do perfil de aço com conector linear



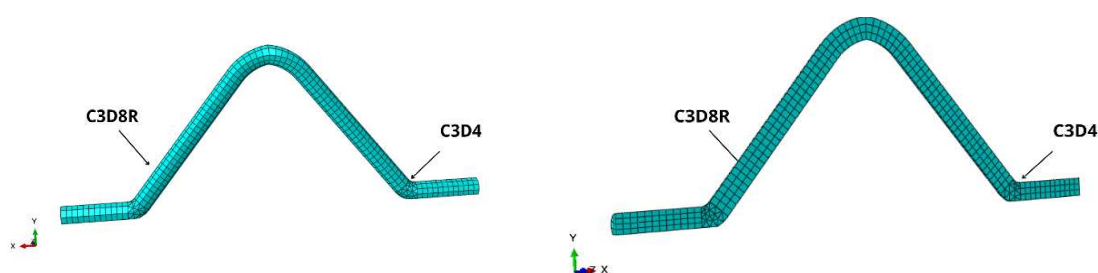


Fonte: Autor (2025)

#### 4.7.5 Conector de cisalhamento treliçado 3D

Para o conector sólido, foram utilizados dois tipos de elementos para configurar a sua malha. Dessa forma, na região com geometria menos complexa, ou seja, nas hastes horizontais e diagonais, foi adotada o elemento C3D8R com 30 mm de dimensão. Na região curva, escolheu o elemento C3D4 de 30 mm de dimensão, devido a geometria complexa nessa região, como pode ser visualizado na Figura 56.

Figura 56 – Malha do conector 3D



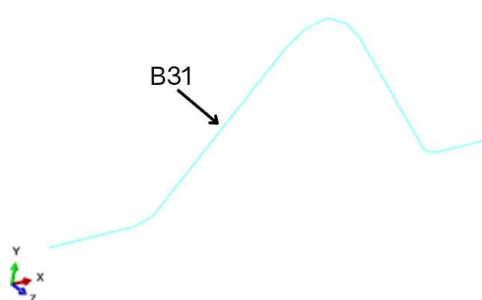
Fonte: Autor (2025)

#### 4.7.6 Conector de cisalhamento linear

Para a malha do conector linear, foi utilizada o elemento de viga B31. Dessa forma, em vez de criar a forma completa do elemento 3D, o elemento B31 funciona como uma linha que pode se comportar como um elemento que sofre deslocamentos e rotações, diferentemente do elemento T3D2 que também representa uma linha, porém, apresenta apenas deslocamentos

em seus nós. Assim, o elemento B31 é muito útil para permitir um modelo numérico mais leve, o que torna as análises mais rápidas sem perder a qualidade nos resultados, quando comparado com o elemento C3D8R e C3D4, como representado no conector tridimensional. Esse elemento possui dois nós, e cada nó apresenta seis graus de liberdade, sendo deslocamentos nas direções x, y e z e rotações em torno dessas direções. O tamanho do elemento da malha B31 é de 15mm, como poder ser observado na Figura 57.

Figura 57 – Malha do conector linear

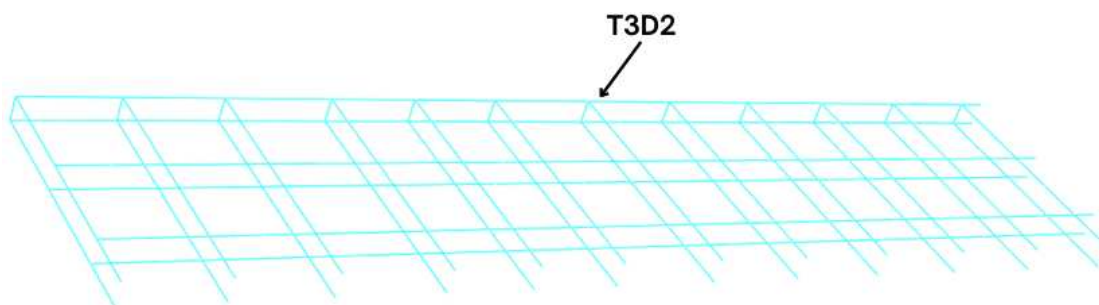


Fonte: Autor (2025)

#### 4.7.7 Armadura utilizada para ambos os modelos

Para a armadura foi utilizada o elemento T3D2, de modo que, apresenta 2 nós e 3 graus de liberdade por nó, consistindo em translações nas direções x, y e z. Por esse motivo, ele é muito usado em treliças, tirantes e barras que se comportam como articulações, ou seja, que não devem resistir aos momentos. Assim, o tamanho do elemento finito é de 15mm, assim como o conector linear. A Figura 58 ilustra a malha utilizada para a armação da viga mista, sendo a mesma para os modelos com conector 3D e conector linear.

Figura 58 – Malha do reforço da laje



Fonte: Autor (2025)

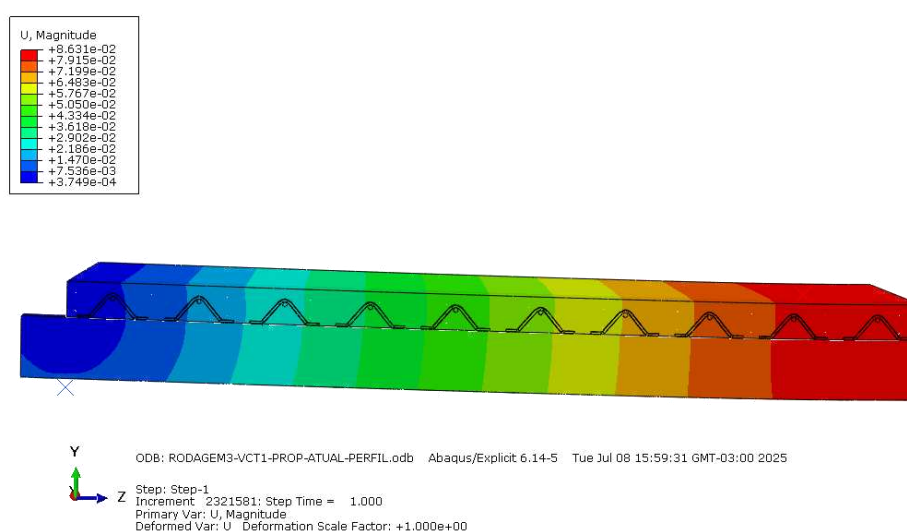
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresentará as validações numéricas para o modelo com conector 3D e com conector linear, onde serão apresentados a comparação do comportamento experimental de Lima 2021, a carga de ruptura dos modelos numéricos, a curva carga x deslocamento e concentração de tensões das simulações numéricas comparadas com o ensaio experimental. Posteriormente, será apresentada a comparação entre o custo computacional dos dois modelos, levando em consideração o tempo de processamento e custo computacional.

### 5.1 Validação numérica da viga mista quanto ao deslocamento vertical

Primeiramente, é importante observar o comportamento da viga mista experimental e numérica após a ruptura, com o intuito de analisar o deslocamento após ser aplicada a carga. Dessa forma, na Figura 59 tem-se a representação do deslocamento do modelo numérico com conector tridimensional, no qual, como pode ser visualizado, o deslocamento é de 80 mm, inserido na aba *Load* para modelagem. A extremidade à direita do modelo numérico representa o meio do vão do modelo experimental, local onde foi aplicado a carga. A Figura 61 apresenta o deslocamento experimental de Lima 2021, de modo que, apresentou deslocamento vertical de, aproximadamente, 80 mm. Logo, percebe-se que o comportamento é semelhante entre o modelo numérico e ensaio experimental.

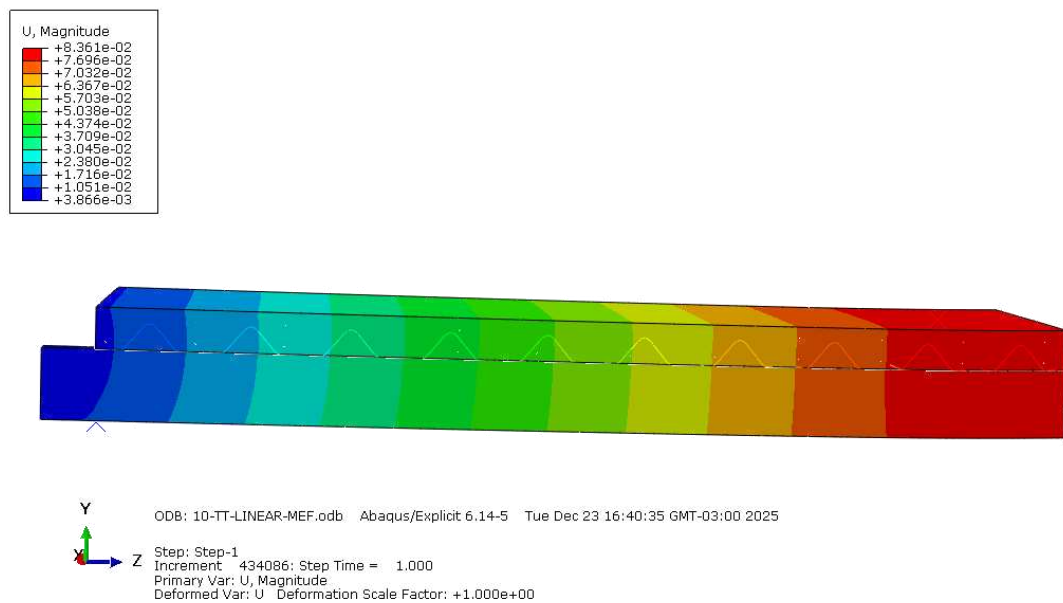
Figura 59 – Deslocamento vertical na viga mista com conector 3D



Fonte: Autor (2025)

De forma semelhante à viga mista validada com conector de cisalhamento tridimensional, o modelo com conector de elemento de viga também apresentou comportamento coerente, se comparado com o deslocamento por Lima (2021). A representação numérica do deslocamento aplicado, também de 80 mm, pode ser vista na Figura 60, semelhante ao deslocamento experimental de Lima (2021), mostrado na Figura 61.

Figura 60: Deslocamento vertical na viga mista com conector linear



Fonte: Autor (2025)

Figura 61 – Deslocamento vertical na viga mista experimental de Lima 2021



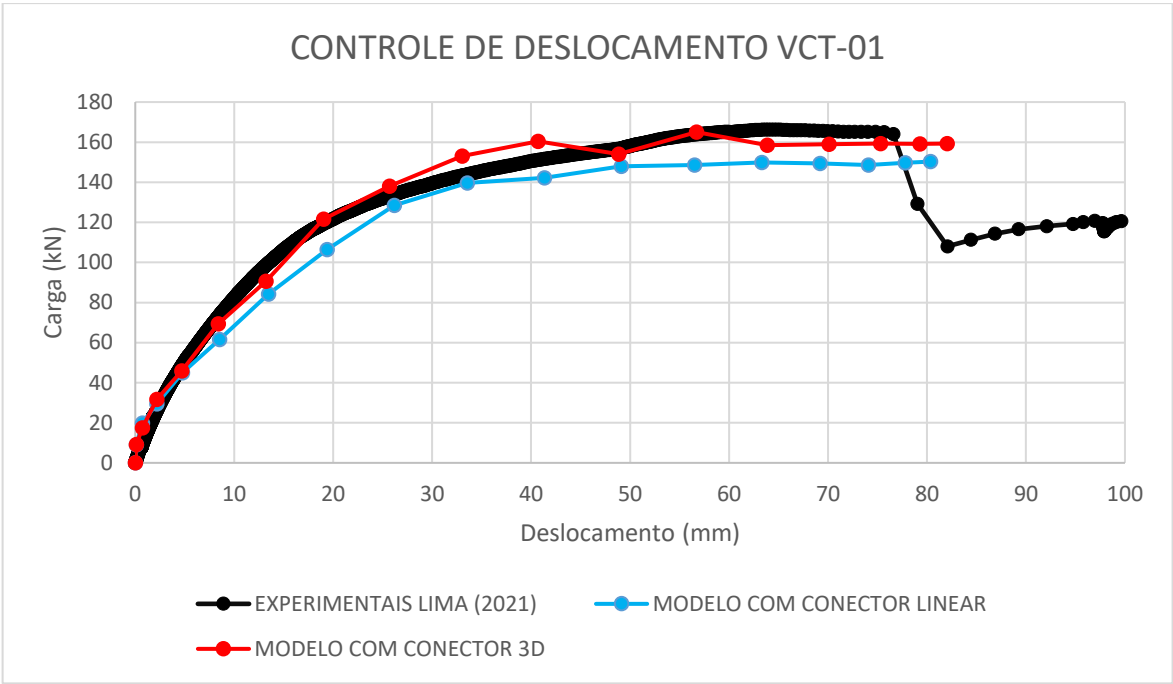


Fonte: Lima (2021)

## 5.2 Validação numérica da viga mista quanto às curvas cargas (kN) x deslocamento (mm)

Quanto à curva carga (kN) x deslocamento (mm) do modelo numérico com conector tridimensional e com elemento de viga, por meio do Gráfico 3 pode-se comparar diretamente os resultados com o comportamento observado no ensaio experimental desenvolvido por Lima (2021). Assim, a curva na cor preta representa os resultados experimentais de Lima (2021), já a curva na cor vermelha representa a curva do modelo numérico com conector tridimensional e a curva na cor azul representa a curva do modelo com conector de elemento de viga. É possível notar um satisfatório ajuste no regime inicial elástico em ambos os modelos, bem como um bom ajuste no regime plástico. Além disso, a maior diferença entre as curvas numéricas em relação a experimental podem ser observadas na Tabela 3. Outrossim, os modelos experimental, numérico com conector tridimensional e numérico com conector de viga, apresentam carga última e erro em relação aos valores experimentais como mostrado na Tabela 4.

Gráfico 3 – Validação dos modelos numéricos quanto às curvas



Fonte: Autor (2025)

Tabela 3: Maior diferença entre as curvas numéricas em relação a experimental

|            | Conector 3D | Conector linear |
|------------|-------------|-----------------|
| Carga (kN) | 8,97        | 16,44           |
| Erro (%)   | 5,6         | 9,93            |

Fonte: Autor (2025)

Tabela 4 – Carga última dos ensaios

| Modelos         | P (kN) | Erro (%) |
|-----------------|--------|----------|
| Experimental    | 164,01 | -        |
| Conector 3D     | 159,26 | 2,98     |
| Conector linear | 150,3  | 9,12     |

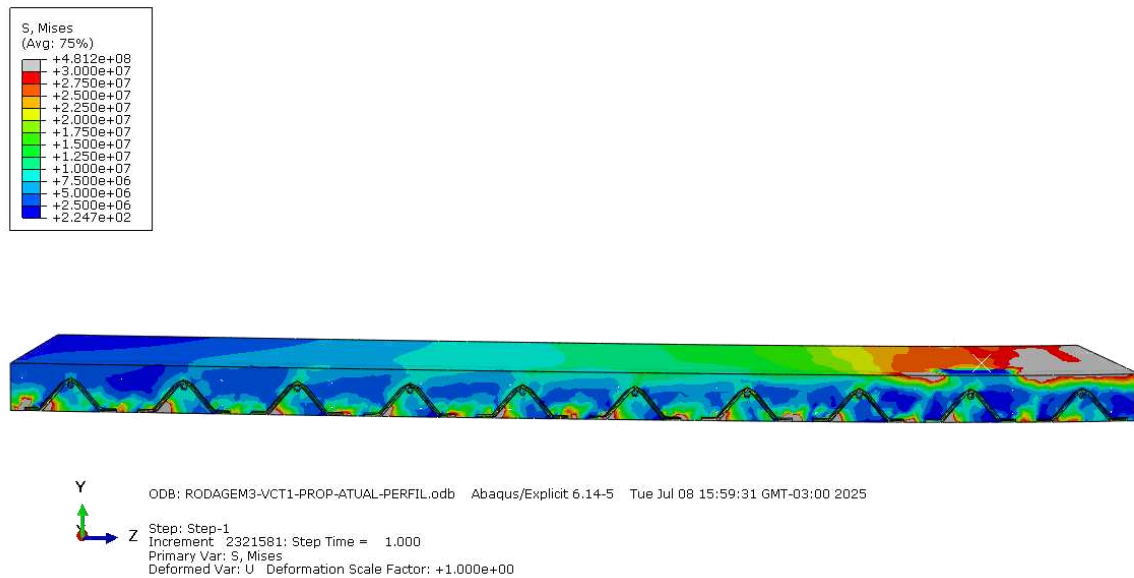
Fonte: Autor (2025)

5.3 Validação numérica da viga mista quanto às distribuições de tensões nas lajes de concreto e nos conectores de cisalhamento

A Figura 62 apresenta a distribuição de tensões na região superior da laje de concreto em decorrência da flexão, comportamento também observado por Lima (2021). O mesmo padrão ocorre na região superior da laje de concreto do modelo numérico com conector de

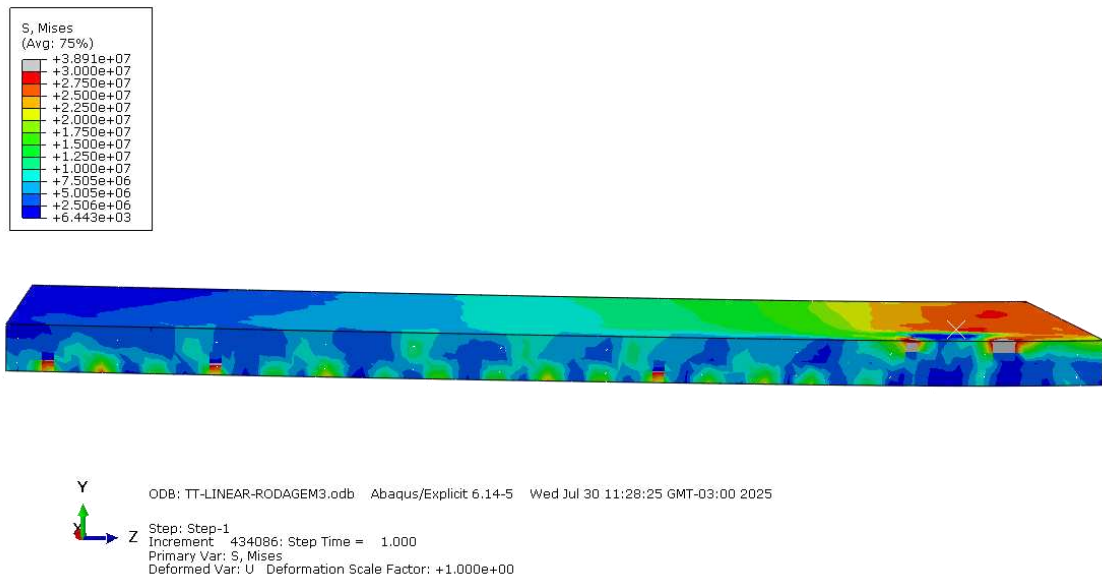
elemento de viga, como observado na Figura 63. Esse comportamento está associado à flexão na laje, uma vez que, com a aplicação do deslocamento, ocorre maior concentração de tensões nas regiões sujeitas a maiores deslocamentos.

Figura 62 – Tensões na região superior da laje do modelo com conector tridimensional



Fonte: Autor (2025)

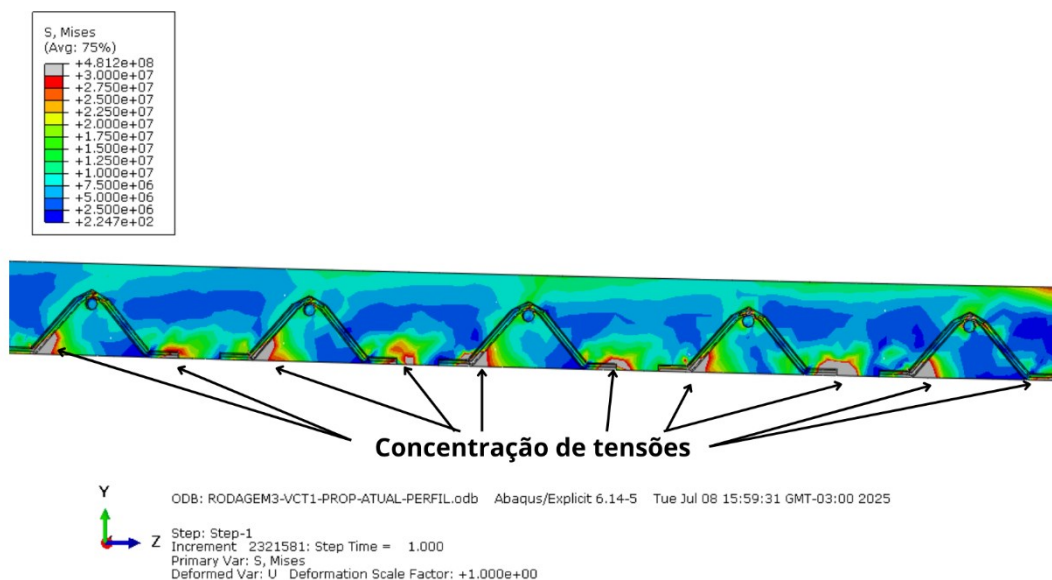
Figura 63: Tensões na região da laje do modelo com conector de elemento de viga



Fonte: Autor (2025)

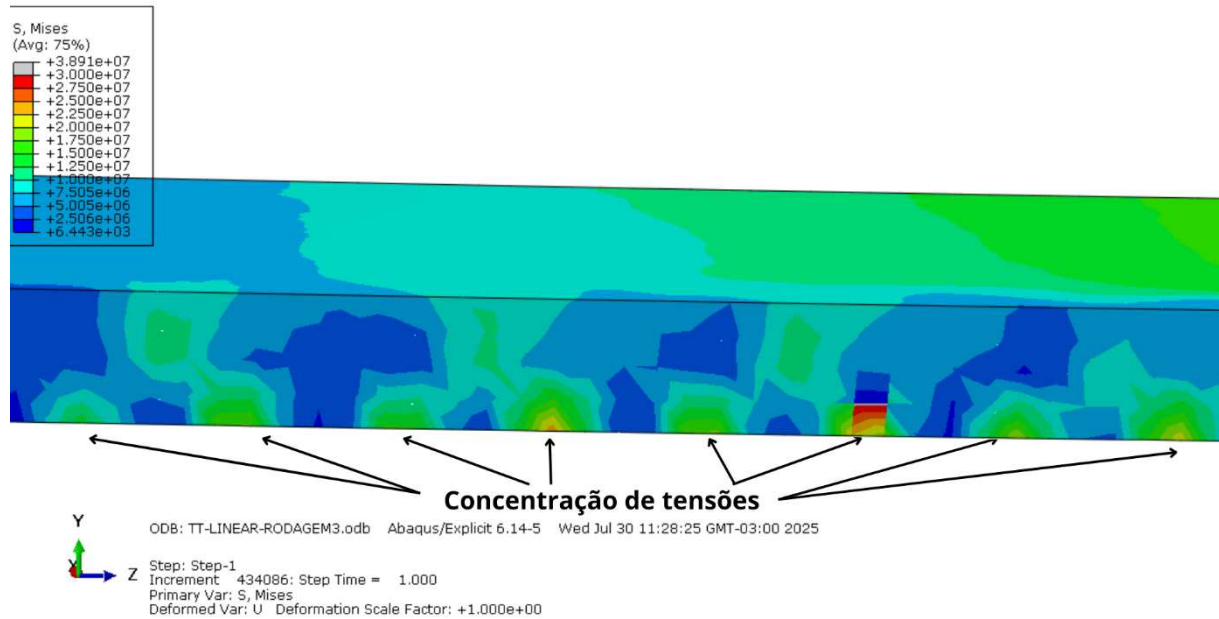
As Figuras 64 e 65 representam a distribuição de tensões nos conectores de cisalhamento, onde pode-se notar uma concentração de tensões nas regiões próximas às hastes dos conectores, no qual, também foi apresentado nos ensaios experimentais de Lima (2021). Isso indica que os conectores estão trabalhando, ou seja, sendo responsáveis por transferir e resistir aos esforços solicitantes na viga mista, ressaltando a sua importância no comportamento estrutural do sistema.

Figura 64 – Tensões na região das hastes dos conectores do modelo com conector tridimensional



Fonte: Autor (2025)

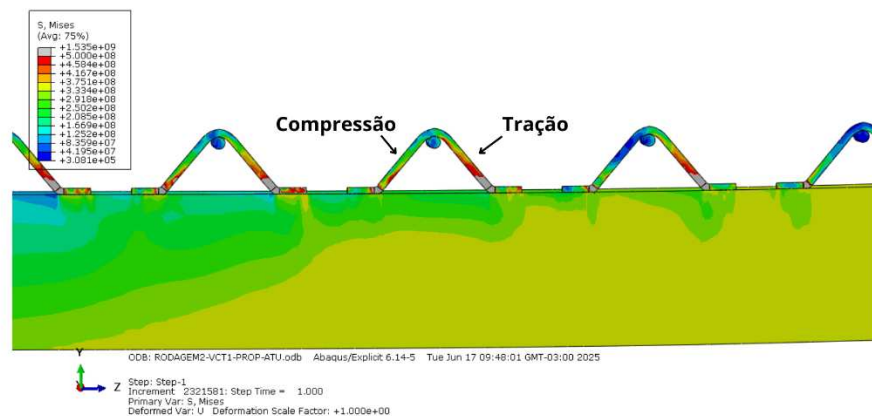
Figura 65: Tensões na região das hastes dos conectores do modelo com conector de elemento de viga



Fonte: Autor (2025)

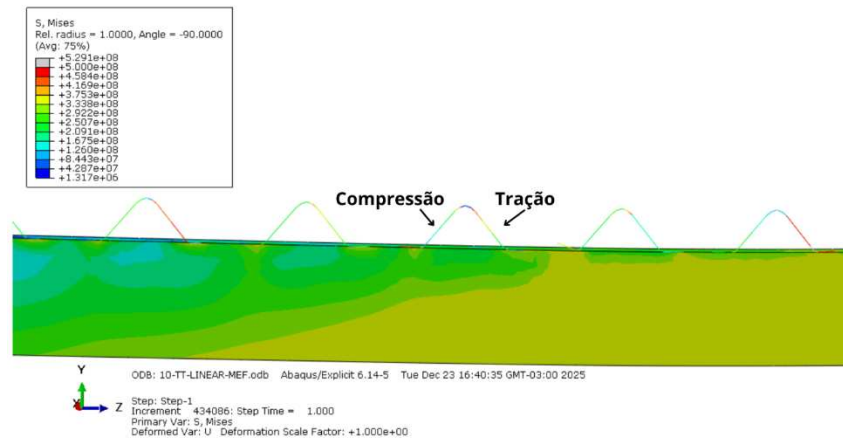
As Figuras 66 e 67, referentes aos modelos numéricos, ilustram de forma clara a distribuição de esforços no conector, no qual indica quais hastes estão submetidas à compressão e quais se encontram sob tração. O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 68, que retrata o ensaio experimental realizado por Lima (2021), o que demonstra boa concordância entre os modelos numéricos e os resultados experimentais.

Figura 66 – Tensões de compressão e tração nos conectores 3D



Fonte: Autor (2025)

Figura 67: Concentração de tensões na laje com conector de elemento de viga



Fonte: Autor (2025)

Figura 68: Distribuição de tensões no conector ensaio experimental de Lima 2021



Fonte: Lima (2021)

#### 5.4 Número de elementos finitos na malha e tempo de processamento

A Tabela 5 apresenta a quantidade de nós e de elementos presentes nas malhas dos elementos estruturais dos modelos numéricos analisados. Dessa forma, quanto maior esses valores, mais complexo torna-se o modelo numérico, o que resulta em um maior esforço computacional para a realização dos processamentos interativos no *software*. Nesse sentido, como pode ser analisado, o modelo com conector sólido apresenta uma quantidade de elementos significativamente superior quando comparada com o modelo com conector linear. Logo, essa diferença evidencia que o conector sólido apresenta uma malha mais detalhada, no qual, torna

o modelo numérico global consideravelmente mais complexo, exigindo maior esforço e processamento computacional.

Tabela 5 – Quantidade de nós dos modelos numéricos

|                  | <b>Número de nós do modelo<br/>com conector tridimensional</b> | <b>Número de nós do modelo com<br/>conector de viga</b> |
|------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Perfil de aço    | 33.796                                                         | 4.800                                                   |
| Laje de concreto | 27.907                                                         | 11.520                                                  |
| Conector         | 1.331                                                          | 13                                                      |
| Armação          | 210                                                            | 210                                                     |

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 6 representa o tempo do processamento numérico para os dois modelos, no qual, mostra os valores do tempo necessário para a validação em minutos e em horas. Nesse contexto, é perceptível que o modelo com conector linear apresenta redução de, aproximadamente, 96,15% no tempo total de processamento computacional. Essa diferença pode ser compreendida por meio da Tabela 3, que mostra que modelo com conector linear possui menos elementos finitos, quando comparado ao modelo que utiliza conector 3D, de modo que, esse último exige maior esforço de cálculo devido à sua maior complexidade geométrica e de malha.

Tabela 6 – Tempo dos modelos numéricos

|         | <b>Modelo com conector tridimensional</b> | <b>Modelo com conector de viga</b> |
|---------|-------------------------------------------|------------------------------------|
| Minutos | 2.205                                     | 85                                 |
| Horas   | 36,75                                     | 1,4167                             |

Fonte: Autor (2025)

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se a modelagem numérica do ensaio à flexão de 4 pontos de uma viga mista proposta por Lima (2021) utilizando o software Abaqus. Dessa forma, para otimizar o desempenho computacional, foi desenvolvido um quarto da geometria experimental original. Essa estratégia permite manter a fidelidade dos resultados e ao mesmo tempo diminuir

o custo computacional, o que permite um processamento mais rápido. Desse modo, a validação do modelo numérico foi feita para a viga mista VCT-01 com conector de cisalhamento treliçado 3D. Posteriormente, desenvolveu-se um outro modelo numérico, substituindo o conector de cisalhamento sólido por um linear, no qual, essa alteração implicou em algumas modificações nas interações de contato definidas no software. Logo, este estudo não apenas apresenta uma validação do modelo numérico, como também analisa o impacto que diferentes formas de modelagem impõem no processamento e resultados.

Uma das etapas mais importantes deste modelo numérico é a definição da malha e o tipo de elementos finitos que são definidos nos elementos estruturais. Nesse contexto, foram aplicadas diversas malhas de elementos finitos, de modo a melhor aproveitar suas características e adaptar a cada situação exigida pela geometria do modelo, podendo citar elementos utilizados para a malha de elementos finitos C3D8R, C3D4, T3D2 e B31. A malha de elementos finitos é crucial para a complexidade do modelo numérico e, consequentemente, tempo de processamento computacional. Logo, como analisado anteriormente, o modelo numérico com conector linear apresenta um custo computacional menor comparado ao modelo numérico com conector 3D, devido às simplicidades de sua malha de elementos finitos.

O resultado da validação numérica é satisfatório para os dois modelos numéricos, de modo que, embora não apresentem resultados muito próximos, apresentam comportamento semelhante à curva carga (kN) x deslocamento (mm). Porém, quando se compara o valor das cargas de ruptura entre o modelo experimental e os dois modelos numéricos, podemos analisar que o modelo numérico com conector linear apresentou um erro maior comparado ao modelo com conector como elemento sólido. Porém, o custo computacional foi inferior, tendo, aproximadamente, 96,15% de redução no tempo de processamento.

Como sugestões para trabalhos futuros, segue-se:

(a) Realizar um estudo paramétrico entre os elementos estruturais e suas características, como a variação no diâmetro e altura do conector de cisalhamento, resistência característica à compressão do concreto;

(b) Realizar a modelagem numérica para a viga VCT-02 e VCT-03, também propostas por Lima (2021). A diferença entre as vigas são o grau de conexão e, consequentemente, o número de conectores de cisalhamento treliçado dispostos ao longo da seção longitudinal da viga mista.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2024.
- BARBOSA, W. C. S. **Estudo de conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas mistas de aço e concreto**. 2016. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, DF, 2016.
- BARBOSA, W. C. S.; BEEZERRA, L. M.; CHATER, L.; CAVALCANTE, O. R. O. Avaliação experimental sobre o comportamento estrutural de conectores de cisalhamento treliçados em vigas mistas de aço e concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 5, p. 1157-1182, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952019000500010>
- BASTOS, P. **Flexão normal simples – vigas**. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista, 2007.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. EN 1994-1-1. **Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. 2004.
- CAVALCANTE, O. R. O. **Estudo de conectores de cisalhamento tipo “V” em viga mista**. 2010. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, 2010.
- FAKURI, R. H. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. Departamento de engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- FIGUEIREDO, L. M. B. **Projeto e construção de pilares mistos aço-concreto**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade São Paulo, São Paulo, 1998.
- FONSECA, F. T. D. **Dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto conforme a ABNT NBR 8800:2008**. 2015. Monografia (Especialização em Estruturas) – Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte, 2015.

LIMA, J. M. **Estudo da capacidade resistente do conector de cisalhamento treliçado via Método dos Elementos Finitos**. 2018. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM – 12A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88p.

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

LIMA, J. M.; BEZERRA, L. M.; BONILLA, J.; BARNOSA, W. C. S. Study of the behavior and resistance of right-angle truss shear connector for composite steel concrete beams. **Engineering Structures**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113778>

LIMA, J. M.; BEZERRA, L. M.; BONILLA, J.; SILVA, R. S. Y. R. C.; BARBOSA, W. C. S. Behavior and resistance of truss-type shear connector for composite steel concrete beams. **Steel and Composite Structures**, v. 36, n. 5, p. 569-586, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2020.36.5.569>

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

MARTINS, A. G. **Estudo do comportamento de vigas mistas com perfil de alma senoidal**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MOURA, P. H. R.; SILVA, R.; LIMA, J. M.; BEZERRA, L. M.; RODRIGUES, G. H. R.; BEZERRA, E. M. F. Investigation of the resistance capacity of the right-angle truss-type shear connector using finite element method. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 21, n. 11, p. e569, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-78258266>

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. Para combater a mudança climática, o setor da construção precisa reduzir em 37% o consumo de energia até 2030. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/263040-para-combater-mudan%C3%A7a-clim%C3%A1tica-o-setor-de-constru%C3%A7%C3%A3o-precisa-reduzir-em-37-o-consumo-de>

OLIVEIRA, L. A. F. D. **Estudo do comportamento e da resistência das vigas mistas aço-concreto construídas por perfis formados a frio e lajes pré-fabricadas**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

**PORTAL DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL**. Brasil produziu cerca de 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição em 2021. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/brasil-produz-48-milhoes-de-toneladas-de-residuos-de-construcao-e-demolicao/>

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MARTINS, A. G. Manual de construção em aço. **Instituto aço Brasil – centro brasileiro da construção em aço**. Rio de Janeiro, v. 1, e. 2, 2012.

SERINOLLI, G. P. Resíduos da construção civil: o novo olhar para a reciclagem. **Revista Científica Semana Acadêmica**, Fortaleza, v. 09, n. 205, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.35265/2236-6717-205-9127>

SOUSA, V. C. **Análise experimental do desempenho de conectores de cisalhamento de vergalhões para estruturas mistas via ensaios push-out**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2022.

SREENIDHI, G. S.; KUMAR, G. S. Demountable shear connector in steel–concrete composite floors: a state-of-the-art review. **Emerging Trends in Composite Structures**, Singapura, v. 387, 2023.

VERÍSSIMO, G. S. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

ZHANG, M.; MA, K.; WEI, J.; WANG, Z.; CAO, K. Experimental study and theoretical analysis of the shear resistance performance of high-strength bolt connectors in prefabricated steel-concrete composite beams. **Structures**, China, v. 81, 2025.