



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

**EMANUEL SILVA CARNEIRO**

**ESTUDO NUMÉRICO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO TIPO ISÓSCELES  
PARA VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO**

**RUSSAS**

**2021**

EMANUEL SILVA CARNEIRO

ESTUDO NUMÉRICO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO TIPO ISÓSCELES  
PARA VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

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. Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante

RUSSAS

2021

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

---

- C288e Carneiro, Emanuel Silva.  
Estudo numérico de conectores de cisalhamento tipo isósceles para vigas mistas de aço e concreto /  
Emanuel Silva Carneiro. – 2021.  
74 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,  
Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante.
1. Estruturas mistas aço-concreto. 2. Vigas mistas aço-concreto. 3. Conectores de cisalhamento. 4.  
Modelo numérico simplificado. I. Título.

CDD 620

---

EMANUEL SILVA CARNEIRO

ESTUDO NUMÉRICO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO TIPO ISÓSCELES  
PARA VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

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

Aprovada em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Wallison Carlos de Sousa Barbosa  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

---

Prof<sup>a</sup>. Ms. Camila Lima Maia  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Família e Amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo amor e proteção dados durante toda minha vida, pelo discernimento, força de vontade, paciência e por me permitir alcançar mais essa conquista.

À minha mãe, Erilene Silva, e a meu pai, Francisco Neldo, por me dar todo o apoio, incentivo, e condições necessários para que eu pudesse correr atrás de meus sonhos, além de todo amor e carinho durante minha criação.

Aos meus irmãos, Wênnia e Wendeson, pelo apoio, carinho e ensinamentos me passados durante meu crescimento e passados ainda hoje.

À minha família, tanto em Banabuiú quanto em Fortaleza, que me apoiam desde sempre e torcem pelo meu bem e por meu futuro.

À Natacha Falcão por todo amor, carinho, apoio e muitas risadas e momentos felizes durante essa fase da minha vida.

Aos meus amigos e irmãos que conheci durante essa fase e àqueles que mantive laço durante a mesma.

Aos meus amigos e colegas de classe que batalharam comigo durante esses cinco anos, espero poder levar vocês durante minha caminhada pela vida.

Ao Douglas Sampaio, Matheus Martins, Matheus Viana e Tálisson Cavalcante especialmente por me aturar e por compartilhar muitos momentos durante essa fase e espero que possam me acompanhar durante o restante da minha vida.

Aos meus colegas que conheci durante minha gestão na Vale J Jr. e que juntamente com eles pude me desenvolver profissionalmente e como pessoa.

A minha veterana Joseanne Alves de Sousa que iniciou a modelagem desses conectores durante seu TCC e me auxiliou durante a criação do modelo apresentado neste trabalho.

Ao meu colega Abdias Gerônimo pelo trabalho em conjunto durante o desenvolvimento da modelagem numérica apresentada neste trabalho.

Aos meus professores por todo conhecimento técnico, experiências profissionais e atitudes éticas que me passaram durante esses cinco anos.

Ao meu orientador, Otávio Rangel, por todos os ensinamentos, paciência e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho e por todo seu conhecimento técnico passado como professor durante as várias cadeiras lecionadas à minha turma.

Ao membro da banca Wallison Barbosa, que desenvolveu o trabalho experimental em que este trabalho se baseou como fonte de calibração do modelo, pela disponibilidade em ser um dos avaliadores da banca e por quaisquer sugestões feitas sobre o tema.

Por fim, a professora Camila Maia, membro da banca avaliadora, pelas várias cadeiras lecionadas durante minha caminhada no campus Russas, pela disponibilidade e por quaisquer sugestões sobre o tema.

## RESUMO

Com o aumento na utilização de estruturas mistas aço-concreto, torna-se imprescindível encontrar meios de se averiguar o comportamento destas estruturas e de seus componentes. A simulação numérica é uma excelente solução, pois com reduzido custo, se comparados com os ensaios experimentais, é possível estabelecer os mais variados estudos. Necessitando inicialmente de calibração do modelo numérico através de um modelo experimental. Desta forma o estudo experimental baseado em premissa de um estudo numérico, se torna mais objetivo e efetivo em suas análises. As vigas mistas aço-concreto somente são possíveis graças a ação dos conectores de cisalhamento que transmitem os esforços e permitem que a laje de concreto e o perfil metálico trabalhem em conjunto. Devido sua importância existem diversos estudos focados no desenvolvimento e avaliação de conectores de cisalhamento. Por meio de modelo experimental encontrado na literatura este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico tridimensional simplificado, em *software* de elementos finitos adotado, que simule o comportamento estrutural apresentado nos modelos experimentais de vigas mistas com conectores do tipo treliçado isósceles de CA-50 com diâmetros de 8,0, 10,0 e 12,5 milímetros. O modelo numérico criado consiste de elementos sólidos, para laje de concreto e perfil metálico, e de elementos de viga, para o conector de cisalhamento, com as malhas da laje e do perfil discretizadas de modo a facilitar os vínculos e acoplamentos com o conector, já a malha do conector foi discretizada de modo a fornecer resultados mais satisfatórios. Cada elemento teve seu comportamento definido de acordo com os materiais utilizados no ensaio experimental, tanto na fase elástica quanto na fase plástica. Para parâmetros de validação do modelo foram escolhidos o deslizamento longitudinal do perfil, o afastamento transversal da laje em relação ao perfil, *uplift*, distribuições de tensão no conector e perfil pelo método de Von Mises e por último a deformada e distribuição de tensões. O modelo numérico simplificado criado atendeu a seus objetivos, pois obteve resultados bastante satisfatórios se comparados aos experimentais, tanto na fase elástica quanto na fase plástica, e o conector estudado se comportou de forma similar ao utilizado no modelo experimental.

**Palavras-chave:** Estruturas mistas aço-concreto. Vigas mistas aço-concreto. Conectores de cisalhamento. Modelo numérico simplificado.



## ABSTRACT

The increase in the use of steel-concrete composite structures makes it essential to find ways to investigate the behavior of these structures and their components. Numerical simulation is an excellent solution because with reduced cost, when compared to experimental tests, it is possible to establish the most varied studies. Initially needing calibration of the numerical model through an experimental model. In this way the experimental study based on the premise of a numerical study becomes more objective and effective in its analysis. The steel-concrete composite beams are only possible thanks to the action of shear connectors that transmit the forces and allow the concrete slab and the steel profile to work together. There are several studies focused on the development and evaluation of shear connectors due to its importance. Through an experimental model found in the literature, this work aims to develop a simplified three-dimensional numerical model in finite element software adopted, which simulates the structural behavior presented in experimental models of composite beams with CA-50 isosceles truss-type connectors with diameters of 8.0, 10.0 and 12.5 millimeters. The numerical model created consists of solid elements used for the concrete slab and metal profile and beam elements used for the shear connector, with the meshes of the slab and profile discretized in order to facilitate the ties and couplings with the connector, while the connector mesh was discretized in order to provide more satisfactory results. The behavior of each element was defined according to the materials used in the experimental test, both in the elastic and plastic phases. For model validation parameters, the longitudinal slip of the profile, the transversal distance of the slab from the profile (*uplift*), stress distributions in the connector and profile by the Von Mises method, finally the deformation and stress distribution were chosen. The simplified numerical model created met its objectives, as it obtained satisfactory results compared to the experimental ones, both in the elastic and plastic phases, and the studied connector behaved similarly to the one used in the experimental model.

**Keywords:** Steel-concrete composite structures. Steel-concrete composite beams. Shear connectors. Simplified numerical model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ponte <i>Rock Rapids Bridge</i> , Iowa, E.U.A. ....	18
Figura 2 - Primeiro conector proposto.....	19
Figura 3 - Viga híbrida e viga mista sujeitas a flexão. ....	22
Figura 4 – Equilíbrio de forças que agem longitudinalmente em uma viga mista. ....	24
Figura 5 - Distribuição de tensões em uma viga mista para graus de conexão diferentes. ....	25
Figura 6 - Comportamento de vigas mistas conforme grau de interação. ....	26
Figura 7 - Curvas Força x Deslizamento de um conector rígido e outro flexível. ....	27
Figura 8 – Detalhes do ensaio <i>push-out</i> conforme EN 1994-1-1:2011. ....	28
Figura 9 - Perfil metálico W 250x73 adotado nos ensaios <i>push-out</i> . ....	30
Figura 10 - Posicionamento dos conectores de cisalhamento e das armaduras das lajes do modelo de conector tipo isósceles, dimensões estão em milímetros. ....	30
Figura 11 - Modelo numérico proposto. ....	31
Figura 12 - Elemento B31 mostrando numeração dos dois nós e ponto de integração. ....	32
Figura 13 - Elemento C3D8R com numeração de nós e ponto de integração.....	32
Figura 14 - Elementos do modelo de elementos finitos (modelo reduzido).....	33
Figura 15 - Conector de cisalhamento discretizado.....	34
Figura 16 - Discretização da laje de concreto.....	34
Figura 17 - Perfil metálico discretizado e com <i>datum planes</i> a mostra.....	35
Figura 18 - Condições de contorno e aplicações do carregamento .....	36
Figura 19 - Sistema de aquisição de dados de carregamento e bombas hidráulicas para aplicação de cargas .....	37
Figura 20 - Interface do programa utilizado na edição de propriedade de interação e de restrição. ....	38
Figura 21 - Interação entre superfície <i>master-slave</i> . ....	39
Figura 22 – Os nós de cor rosa indicam restrição <i>tie</i> e <i>coupling</i> .....	40
Figura 23 - Numeração dos nós onde <i>coupling</i> será modificado durante simulação. ....	41
Figura 24 - Curva tensão x deformação do perfil metálico. ....	42
Figura 25 - Características elásticas do perfil metálico. ....	43
Figura 26 - Impute de dados da fase plástica do perfil metálico. ....	44
Figura 27 - Curvas tensão x deformação do aço CA-50 obtidas experimentalmente. ....	45
Figura 28 - Impute de dados da fase plástica dos conectores de cisalhamento. ....	47

Figura 29 - Dados utilizados para que o programa possa simular a fase plástica do concreto usado na laje. ....	48
Figura 30 - Impute de dados para simulação do comportamento a compressão do concreto. .	49
Figura 31 - Pontos utilizados para aquisição de deslocamentos.....	50
Figura 32 - Mapa de fissuras das faces externas das lajes dos modelos I12,5. ....	54
Figura 33 - Deslocamento em magnitude para os perfis metálicos e conectores de cisalhamento. ....	57
Figura 34 - Distribuição de tensões equivalentes de Von Mises ( $\text{kN/mm}^2$ ) no modelo numérico. ....	63
Figura 35 – Comparação das deformadas dos conectores de cisalhamento.....	64
Figura 36 - Distribuição de tensões na direção XX ( $\text{kN/mm}^2$ ) no modelo numérico de E1-10,0 para carga de 800kN. ....	66

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curvas de tensão x deformação para conector de Ø8,0. ....	46
Gráfico 2 – Curvas de tensão x deformação para conectores de Ø10,0 e Ø12,5. ....	46
Gráfico 3 - Curva tensão x deformação utilizada no concreto da simulação. ....	49
Gráfico 4 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 8,0 mm. ....	51
Gráfico 5 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 10,0 mm. ....	52
Gráfico 6 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 12,5 mm. ....	53
Gráfico 7 - Gráfico de <i>uplift</i> por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 8,0 mm. ....	59
Gráfico 8 - Gráfico de <i>uplift</i> por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 10,0 mm. ....	60
Gráfico 9 - Gráfico de <i>uplift</i> por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 12,5 mm. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos conectores obtidas experimentalmente.....	45
Tabela 2 – Deslizamento longitudinal dos perfis metálicos por intensidade de carga para conectores com 8,0 mm. ....	54
Tabela 3 - Deslizamento longitudinal dos perfis metálicos por intensidade de carga para conectores com 10,0 mm. ....	55
Tabela 4 - Deslizamento longitudinal dos perfis metálicos por intensidade de carga para conectores com 12,5 mm. ....	56
Tabela 5 - <i>Uplift</i> da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 8,0 mm. ....	62
Tabela 6 - <i>Uplift</i> da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 10,0 mm. ...	62
Tabela 7 - <i>Uplift</i> da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 12,5 mm. ...	62

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	15
<b>1.2</b>	<b>Objetivos da pesquisa</b> .....	16
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	16
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	16
<b>1.3</b>	<b>Organização do trabalho</b> .....	17
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Histórico</b> .....	18
<b>2.2</b>	<b>Vigas mistas de aço-concreto</b> .....	20
<b>2.2.1</b>	<b><i>Interface aço-concreto</i></b> .....	21
<b>2.2.1.1</b>	<b><i>Aderência entre aço e concreto</i></b> .....	22
<b>2.2.1.2</b>	<b><i>Grau de conexão e grau de interação</i></b> .....	22
<b>2.2.1.2.1</b>	<b>Grau de conexão</b> .....	23
<b>2.2.1.2.2</b>	<b>Grau de interação</b> .....	25
<b>2.3</b>	<b>Conectores de cisalhamento</b> .....	26
<b>2.4</b>	<b>Ensaio de cisalhamento (<i>push-out</i>)</b> .....	27
<b>3.</b>	<b>ANÁLISE NUMÉRICA</b> .....	29
<b>3.1</b>	<b>Metodologia</b> .....	29
<b>3.2</b>	<b>Estudo de caso</b> .....	29
<b>3.3</b>	<b>Elementos Finitos adotados</b> .....	31
<b>3.3.1</b>	<b><i>Elemento B31</i></b> .....	31
<b>3.3.2</b>	<b><i>Elemento C3D8R</i></b> .....	32
<b>3.4</b>	<b>Definição da malha de elementos finitos</b> .....	32
<b>3.4.1</b>	<b><i>Discretização do conector de cisalhamento adotado</i></b> .....	33
<b>3.4.2</b>	<b><i>Discretização da laje de concreto</i></b> .....	34
<b>3.4.3</b>	<b><i>Discretização do perfil metálico</i></b> .....	35

3.5	Condições de contorno e aplicação do carregamento.....	35
3.6	Acoplamentos/Vínculos entre elementos .....	37
3.7	Propriedades dos materiais.....	41
3.7.1	<i>Perfil metálico</i> .....	42
3.7.2	<i>Conectores de cisalhamento</i> .....	44
3.7.3	<i>Laje de concreto</i> .....	47
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	50
4.1	Deslizamento longitudinal.....	50
4.2	“ <i>Uplift</i> ” .....	58
4.3	Tensão de Von Mises .....	63
4.4	Conector de cisalhamento .....	64
4.4.1	<i>Deformada</i> .....	64
4.4.2	<i>Tensões na direção XX</i> .....	65
5.	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	67
5.1	Conclusão .....	67
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	69
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	70

## 1. INTRODUÇÃO

São definidas pela atual norma brasileira de “Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios” (NBR 8800:2008) como estruturas mistas de aço-concreto, aquelas em que ambos os materiais trabalham de forma solidária, comportando-se como um único material.

Segundo Kirchhof (2004) os sistemas estruturais mistos vêm sendo bastante utilizados na construção civil ao redor do mundo, como em edifícios comerciais e indústrias. Cita ainda como exemplos as lajes mistas aço-concreto (lajes de concreto com fôrma de aço incorporada, *steel deck*), as vigas mistas aço-concreto (lajes de concreto sobre vigas de aço) e os pilares mistos aço-concreto (pilares de aço protegidos ou preenchidos com concreto).

Nos elementos mistos feitos de aço e concreto, procura-se fazer o aço trabalhar em regime de tração e o concreto, de compressão. Pois assim o aço supre a deficiência do concreto em relação à esforços de tração e o concreto torna os elementos menos esbeltos suprimindo a instabilidade que o aço possui em relação a esbeltez da peça. E como os esforços se dividem entre aço e concreto, isso gera uma redução nas dimensões da seção das peças de aço, diminuindo assim os custos finais da construção. Ainda coloca que um elemento misto geralmente é mais rígido que um não-misto de mesmas dimensões, sofrendo menos deformações e vibrações (VERÍSSIMO,2007).

Para Barbosa (2016) as interações das estruturas aço-concreto realizadas entre o perfil metálico e o concreto armado, se dão na interface entre aço e concreto por meio de esforços longitudinais de cisalhamento. Sendo estes manifestados por meio dos conectores de cisalhamento, das forças de atrito apresentadas nas regiões de contato e pela aderência natural entre dois materiais. Estes dois últimos não são levados em consideração no cálculo de estruturas mistas. Por isso, existe a necessidade da utilização dos conectores de cisalhamento para que esta interação ocorra e o sistema possa ser considerado misto entre aço-concreto.

O processo de validação do conector se dá por meio de uma análise experimental, ensaios de *push-out*, que requerem grande investimento para que possam ser realizados. Por meio destes ensaios é possível estabelecer uma calibração de um modelo numérico, no caso em elementos finitos (EF). Um modelo numérico calibrado constitui a base para o desenvolvimento de todos os ensaios que venham a ser desenvolvidos, permitindo-os ser mais objetivos e precisos.



## 1.1 Justificativa

Os conectores de cisalhamento *stud bolt* e conector tipo U são os tipos mais utilizados no Brasil, e têm suas metodologias de dimensionamento, detalhes de execução e de projeto previstos pela NBR 8800:2008.

Os conectores de cisalhamento tipo U proporcionam uma menor fissuração no concreto das lajes. Pois proporciona uma melhor distribuição das tensões devido sua maior área de contato entre conector e laje de concreto. Além disso é facilmente fabricado a partir de perfis metálicos do tipo U. Suas desvantagens seriam sua baixa produtividade durante instalação e incompatibilidade com sistemas de lajes mistas com formas incorporadas (BARBOSA, 2016).

Já o conector *stud bolt* possui grande produtividade na instalação e pode ser aplicado em formas metálicas e em pré-lajes. Já suas desvantagens seriam seu baixo desempenho à fadiga e a indispensabilidade de uma máquina de solda especial, que além de ter um alto custo de aquisição necessita de um gerador de 225 kVA disponível no canteiro de obras (VERÍSSIMO, 2007).

Barbosa (2016) visando reduzir os custos com materiais e não depender de equipamentos e instalações específicos apenas para a instalação dos conectores. Propôs o uso de um conector do tipo treliçado empregando vergalhões de aço CA-50 na sua construção.

O conector treliçado proporciona uma redução de custos pois os vergalhões utilizados são facilmente encontrados no mercado e possuem preços mais acessíveis se comparados com os perfis metálicos e *studs bolts*. Além de não requerir instalações nem equipamentos específicos para implantação dos mesmos (BARBOSA, 2016).

Para atestar isso Barbosa (2016) realizou, ensaios experimentais de cisalhamento direto, *push-out*, previsto na norma EN 1994-1-1:2011. Através desse ensaio foi atestado que esse tipo de conector apresenta um comportamento dúctil e plástico ideal para deformações de ruptura. Além de bom comportamento em relação à resistência ao *uplift*, deslocamentos longitudinais e possuírem grandes valores de carga resistente ao cisalhamento.

Os estudos experimentais, como o realizado por Barbosa (2016), são de fundamental importância. Pois além de elucidar diversos questionamentos, apresentam o comportamento real da estrutura e apresentam subsídios imprescindíveis para a calibração de modelos numéricos

Apesar da necessidade inicial de calibração, assim que calibrado o modelo pode ser utilizado como base para estudos relacionados a outras situações. Como por exemplo, o

comportamento dessas vigas mistas em situação de incêndio, situações de abalos sísmicos, dentre outras.

## **1.2 Objetivos da pesquisa**

### ***1.2.1 Objetivo geral***

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma estratégia de modelagem numérica, com grau de acuidade satisfatório, em modelo reduzido, do ensaio de *push-out* de vigas mistas aço-concreto, usando-se o conector experimentado por Barbosa (2016), especificamente os conectores de tipo isósceles com vergalhões de aço CA-50 e com diâmetros de 8,0, 10,0 e 12,5 milímetros.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Determinação da geometria e condições de contorno adequadas para um modelo numérico com apenas um conector, que represente adequadamente o modelo completo (8 conectores) de forma satisfatória;
- b) Conseguir simular, de forma satisfatória, o comportamento plástico da estrutura mista estudada;
- c) Desenvolver modelo numérico simplificado, porém que represente de forma satisfatória o comportamento da estrutura estudada, com pouca necessidade de esforço computacional e com baixo tempo de processamento;
- d) Aferir o modelo numérico, criado com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), pelo modelo experimental de Barbosa (2016) em uma análise elástica e plástica, utilizando como parâmetros: deslizamento longitudinal, *uplift*, distribuição de tensões e deformada do conector. De modo a possibilitar o desenvolvimento de outras análises utilizando estes dados de calibração do modelo numérico.

### 1.3 Organização do trabalho

Este trabalho possui 5 capítulos, cada capítulo tratando dos temas que serão apresentados a seguir.

O capítulo 1 traz uma breve introdução sobre o tema abordado, estruturas mistas e os conectores de cisalhamento utilizados nas mesmas, as justificativas para a realização deste trabalho, os objetivos gerais e específicos buscados durante esse estudo e por último a forma de organização deste trabalho.

O capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica com uma breve contextualização histórica sobre as estruturas mistas e os trabalhos abordando este tema tanto de forma experimental quanto de forma numérica. Aborda também as vigas mistas e, de forma geral, o funcionamento das conexões aço-concreto. Além de abordar os conectores de cisalhamento utilizados nestas estruturas e o ensaio de cisalhamento *push-out* empregue para caracterização destes conectores.

O capítulo 3 apresenta a concepção do modelo numérico criado em *software* de elementos finitos. Apresentando o caso experimental estudado utilizado na aquisição de dados para criação do modelo. Traz também a definição dos elementos finitos adotados, da malha destes elementos, as condições de contorno e de carregamento, acoplamentos/vinculações e as características atribuídas para cada material.

O capítulo 4 traz a apresentação dos resultados da simulação numérica do modelo adotado e a comparação e análise dos mesmos, com os resultados experimentais apresentados por Barbosa (2016).

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com a realização deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Histórico

Com o advento da primeira revolução industrial o ferro, e conseqüentemente o aço se tornaram materiais com produção em larga escala. Inicialmente na Inglaterra e depois para o restante da Europa Ocidental e Estados Unidos, tornando construções que utilizam aço viáveis.

Griffis (1994) diz que as primeiras construções em estruturas mistas nos Estados Unidos são do ano de 1894, sendo o edifício *Methodist Building* em Pittsburgh e a ponte *Rock Rapids Bridge* em Iowa, mostrada na Figura 1, que utilizaram vigas metálicas com revestimento em concreto para que este protegesse a estrutura principal de danos causados pela corrosão ou em casos de incêndio.

Figura 1 - Ponte *Rock Rapids Bridge*, Iowa, E.U.A.



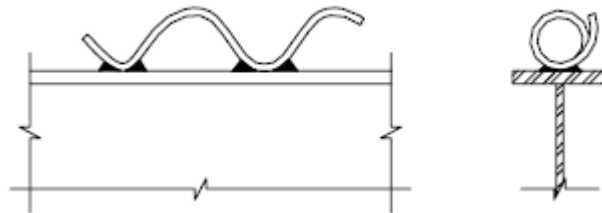
Fonte: Smith (2005).

Segundo Mahdi et al (2012) antes da década de 1970, várias pontes no mundo foram construídas num sistema composto de lajes de concreto simplesmente apoiadas sobre vigas de aço. Implicando assim num regime de trabalho independente entre esses dois materiais. Porém com as solicitações de carregamento atuais, essas estruturas tiveram que ser reforçadas ou substituídas.

No ano de 1929, Caughey e Scott mencionaram em um artigo, como tema voltado para dimensionamento de vigas de aço e lajes de concreto, a necessidade de conectores para vincular os dois materiais e resistir ao corte longitudinal. Expuseram ainda um debate sobre a influência do escoramento na deformação e resistência das vigas.

Viest (1960) menciona que o primeiro estudo com conectores mecânicos ocorreu na Suíça. O conector utilizado era formado por meio de barras circulares em formato helicoidal como mostrado na Figura 2. Kotinda (2006) coloca que os estudos com o conector mais utilizado atualmente, *stud bolt*, tiveram início em 1954 na Universidade Lehigh e na Universidade de Illinois.

Figura 2 - Primeiro conector proposto.



Fonte: Viest (1960) *apud* Chaves (2009).

Durante a década de 60, foram realizados diversos estudos de natureza experimental, sendo a maioria destes com o conector do tipo *stud bolt*.

Chapman e Balakrishnan (1964) detalham o comportamento de dezessete vigas, estas suportando um carregamento uniformemente distribuído e um carregamento concentrado no meio do vão, variando o número de conectores, o diâmetro e altura e forma de distribuição destes na viga.

Um ano depois Slutter e Driscoll (1965) apresentam resultados experimentais sobre a verificação da resistência última à flexão, e a criação de um método para determinar o número mínimo de conectores necessários em vigas mistas.

Com o avanço na tecnologia de microcomputadores, os estudos desenvolvidos por meio de análises numéricas tornaram-se mais utilizados. Como exemplos de análises de vigas mistas com interação parcial tem-se Arizumi e Hamada (1980) caracterizando a formulação de um elemento finito criado para a simulação do comportamento de vigas mistas aço-concreto. E posteriormente Al-Amery e Roberts (1990) com o incremento de uma formulação em diferenças finitas para análise de vigas mistas.

No Brasil, a primeira normatização de viga mista foi na NBR-8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios em 1986. O primeiro pesquisador do assunto no Brasil foi Malite em sua tese de mestrado de 1990, com prosseguimento em 1993 no seu doutorado, onde ensaiou 3 tipos de conectores de cisalhamento de chapa dobrada, sendo estas a cantoneira simples, a enrijecida e o perfil U (KIRCHHOF, 2004).

Veríssimo (2007) coloca em seu trabalho que a utilização de estruturas mistas no Brasil, nos anos de 1950 e 1960, ficou restrita a alguns poucos edifícios e pequenas pontes.

Porém que, nas últimas décadas, em decorrência das vantagens construtivas e do desenvolvimento tecnológico, a demanda por esses sistemas mistos aumentou substancialmente. Diversos trabalhos de pesquisa sobre esse tema foram produzidos, destacando-se Malite (1990 e 1993); Veríssimo (1996); Alva (2000); Oliveira (2001); Kotinda (2006); Cavalcante (2010); Barbosa (2016); Sousa (2019).

Kotinda (2006) apresenta simulações do comportamento estrutural de modelos numéricos tridimensionais de vigas mistas, focando na interface entre viga de aço e laje de concreto. Os conectores utilizados foram do tipo *stud bolt*, no *software* ANSYS, usando como base o Método dos Elementos Finitos. Comparando seus resultados com valores experimentais, retirados de pesquisas realizadas por Chapman e Balakrishnan (1964).

Em seu trabalho Cavalcante (2010) realizou 16 ensaios experimentais de *push-out* para confirmar os dados obtidos em análises numéricas pelo Método dos Elementos Finitos realizadas com conectores do tipo concha em V. Onde se foi verificado aspectos de *uplift*, deformação, ductilidade, fissuração do concreto e modos de colapso do conector em questão. Os resultados mostraram o conector V como uma alternativa de conector de cisalhamento para uso em vigas mistas de aço-concreto.

Barbosa (2016) executou um programa experimental com 24 modelos, contendo conectores do tipo treliçado retangulares, isósceles e *stud bolt*, com o intuito de respaldar o desempenho dos conectores treliçados. Foi realizado também uma análise numérica por meio do *software* ANSYS. Foram verificados aspectos de deslizamento longitudinal, *uplift*, ductilidade, deformação, fissuração do concreto e modos de colapso do conector proposto. Os conectores do tipo treliçado mostraram resultados satisfatórios quando comparados aos do tipo *stud bolt*.

Sousa (2019) realizou uma análise elástica do comportamento de conectores treliçados isósceles através de modelos numéricos, simulando estruturas mistas, aferindo seus resultados numéricos com os obtidos experimentalmente por Barbosa (2016). Usou como parâmetros de validação o deslocamento longitudinal, *uplift*, distribuição de tensões no perfil e nos conectores e, por último, a deformada dos conectores e sua distribuição de tensões.

## **2.2 Vigas mistas de aço-concreto**

Queiroz et al. (2012) estabelece um sistema como misto, aquele em que um perfil de aço, seja laminado, soldado ou a frio, trabalha conjuntamente com o concreto formando um pilar misto, uma laje mista, uma viga mista ou ligação mista.

Kotinda (2006) caracteriza as vigas mistas aço-concreto como sendo uma associação entre um perfil de aço e uma laje de concreto, de modo que ambos trabalhem em conjunto para resistir aos esforços de flexão. Estabelece ainda que a associação entre perfil metálico e laje se dá por meio de elementos metálicos soldados à mesa superior da viga e que se encontram embutidos na laje de concreto. Elementos estes chamados de conectores de cisalhamento.

Veríssimo (2007) acresce, colocando que estes conectores de cisalhamento permitem a transferência das forças longitudinais do perfil de aço para a laje de concreto, e vice-versa. Além de resistirem às forças transversais ao eixo da estrutura, que tendem a separar o perfil da laje, efeito chamado de *uplift*. Aponta também algumas vantagens ao se utilizar um sistema misto. Dentre elas se tem uma otimização na utilização das características dos materiais e uma complementação entre o aço e o concreto.

A otimização advém da possibilidade da utilização do concreto para resistir apenas aos esforços de compressão e o aço resistindo aos de tração, permitindo a economia de aço, se comparado com estruturas apenas metálicas, e criando menores dimensões das peças, se comparados a estruturas de concreto armado.

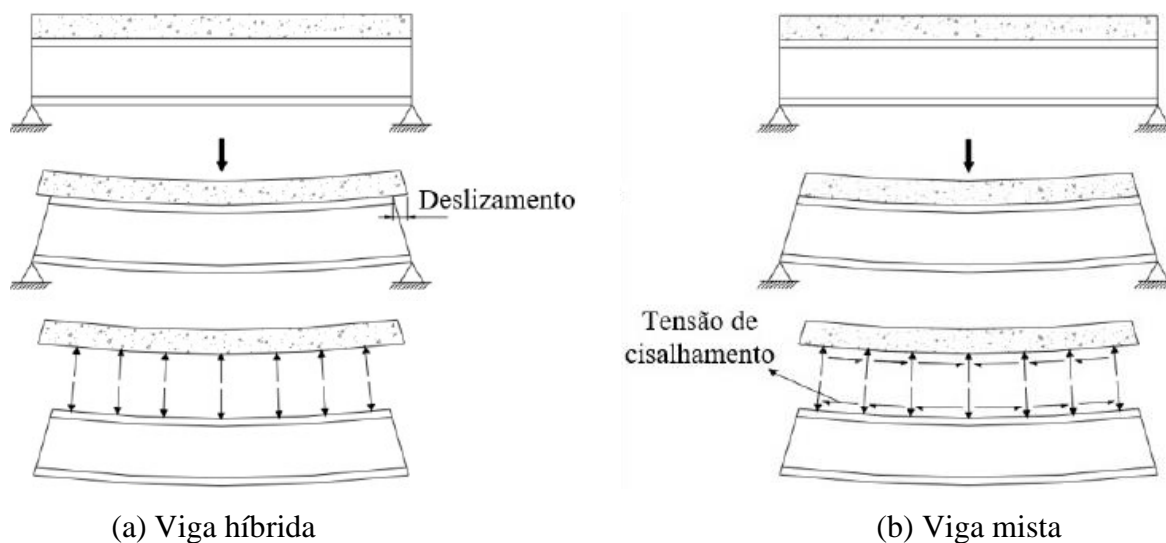
Quanto a complementação, esta se dá na redução da esbeltez, se comparadas uma estrutura mista e outra apenas metálica, e a redução no peso próprio, se comparadas com estruturas de concreto armado.

### **2.2.1 Interface aço-concreto**

De modo geral, a parte superior, laje de concreto, de uma estrutura mista é solicitada a compressão e a base, perfil metálico, é solicitada a tração. O concreto da laje e o aço do perfil possuem uma tendência de deslizamento entre si, pois possuem propriedades mecânicas e geométricas distintas, gerando assim respostas diferentes em cada material (QUEIROZ et al, 2001).

São chamadas vigas híbridas aquelas que não possuem conectores de cisalhamento, e conseqüentemente esse deslizamento ocorre livremente, e por isso os dois materiais agem isoladamente e não há uma interação conjunta. Já nas vigas que possuem os conectores de cisalhamento, os materiais trabalham em conjunto e são chamadas de vigas mistas (QUEIROZ et al, 2001). Pode-se observar a diferença de comportamento a flexão entre uma viga híbrida e uma viga mista na Figura 3.

Figura 3 - Viga híbrida e viga mista sujeitas a flexão.



Fonte: David (2007).

### 2.2.1.1 Aderência entre aço e concreto

Barbosa (2016) afirma que tanto a aderência natural que ocorre entre o perfil de aço e a laje de concreto, quanto o atrito entre os mesmos não são levados em conta para o dimensionamento de estruturas mistas.

Por isso durante um ensaio experimental em conectores de cisalhamento, chamado de cisalhamento direto *push-out*, há a instrução da EN 1994-1-1:2011 de aplicar sobre a interface viga-laje uma camada de graxa ou substância que retire qualquer interação entre essas duas faces (CHATER, 2015).

Entretanto vale reforçar que, segundo Veríssimo (2007), essas forças de atrito, mesmo não sendo consideradas no dimensionamento e análise dos conectores, por se comportarem de forma pouco previsível, podem apresentar valores elevados.

### 2.2.1.2 Grau de conexão e grau de interação

Cabe aqui expor dois conceitos empregados para o melhor entendimento do comportamento de uma viga mista e de seus materiais, sendo estes: grau de conexão, completo ou parcial, e grau de interação, total ou parcial.



### 2.2.1.2.1 Grau de conexão

Segundo Charter (2015) o grau de conexão de uma viga é dito total ou completo quando sua resistência não é dependente dos conectores. Mas sim das deformações máximas, do concreto e do aço, apresentadas na seção transversal com maior solicitação. Sendo o caso em que a resistência depende dos conectores, a viga é considerada com grau de conexão parcial.

A fórmula para calcular o grau de conexão  $\eta_i$ , Equação 1, é apresentada pela NBR 8800:2008, em seu item O.2.3.1.1.2, e também por Oehlers et al (1997).

$$\eta_i = \frac{\Sigma Q_{Rd}}{F_{hd}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$\Sigma Q_{Rd}$ : Somatório das forças resistentes de cálculo individuais dos conectores de cisalhamento situados entre a seção de momento positivo máximo e a seção mais próxima de momento nulo;

$F_{hd}$ : Força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje, tomado como o menor valor dentre a resistência ao escoamento da seção bruta do perfil inteiro de aço e a resistência à compressão da seção da laje considerada como colaborante.

Sendo, segundo a norma NBR 8800:2008, o grau de conexão completo quando  $\eta_i$  é igual a 1, e parcial quando o resultado for entre 0 e 1. A norma limita que  $\eta_i$  deve ser no mínimo 0,4.

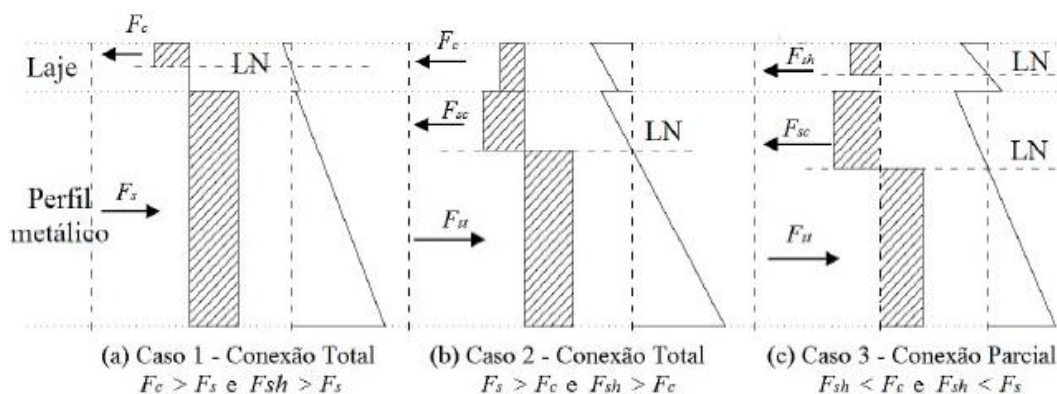
Oehlers et al (1997) colocam em seu trabalho que durante a flexão de uma viga mista são geradas, em sua seção transversal, uma força resultante de compressão  $F_{comp}$  no concreto, de tração  $F_s$  no perfil de aço e de cisalhamento  $V_{sh}$  agindo na interface laje-perfil.

A capacidade de uma viga mista de resistir à flexão pode ser definida encontrando-se uma distribuição de tensões que leve ao equilíbrio das forças horizontais, com  $F_{comp}$  igual a  $F_s$  (OEHLERS et al, 1997).

A Figura 4 demonstra visualmente como se dá a distribuição de tensões na seção transversal da estrutura aço-concreto.



Figura 5 - Distribuição de tensões em uma viga mista para graus de conexão diferentes.



Fonte: Oehlers e Bradford (1995) apud Barbosa (2016).

Charter (2015) informa que usualmente no dimensionamento de uma viga mista, é determinada a resistência mínima dos conectores para a obtenção do grau de conexão total. Obtendo assim a quantidade e as dimensões dos mesmos, e então prosseguir ao cálculo de dimensionamento sem contar com a influência dos conectores.

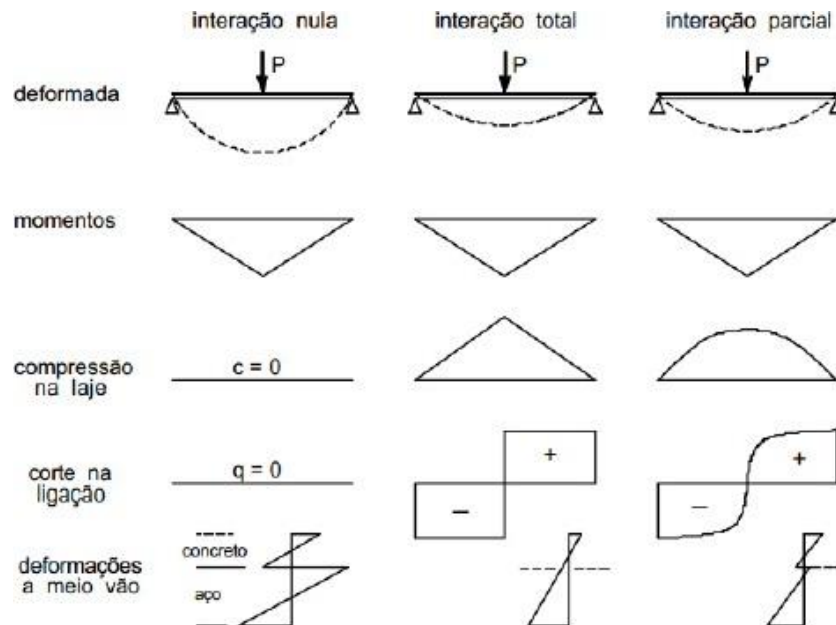
#### 2.2.1.2.2 Grau de interação

Como explica Charter (2015), o grau de interação está associado com o deslizamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto. De modo que, quando o grau de interação é nulo, ocorre, livremente, o deslizamento entre laje e perfil, sendo assim uma viga híbrida e não uma viga mista.

Não havendo nenhum deslizamento entre o aço e o concreto, tem-se então grau de interação máximo, situação essa só ocorrendo caso os conectores de cisalhamento apresentassem rigidez infinita. Desse modo a viga mista teria um comportamento totalmente solidário entre laje de concreto e perfil metálico, tendo uma única linha neutra e com a hipótese de Navier-Bernoulli, de que todas as seções planas permaneceram planas, ao longo de toda a viga mista (CHARTER, 2015).

Como último caso se tem a interação parcial, em que ocorre o deslizamento relativo entre laje e perfil, porém em menor escala ao que ocorre no caso de grau nulo, gerando duas linhas neutras no diagrama de deformações (CHARTER, 2015). A Figura 6 demonstra cada caso de grau de interação comentado acima.

Figura 6 - Comportamento de vigas mistas conforme grau de interação.



Fonte: Malite (1990).

Conforme colocado por Johnson (1975) ensaios *push-out* mostram que mesmo para pequenos carregamentos o deslizamento nunca é zero.

Para chegarem de forma analítica à uma expressão do grau de interação entre o aço e o concreto, Oehlers et al (1997), admitem um comportamento elástico para o perfil metálico e para a laje de concreto e um comportamento plástico para os conectores de cisalhamento. Esta expressão depende das rigidezes da laje de concreto, do perfil metálico e dos conectores de cisalhamento, conforme mostrado na Equação 2.

$$\varphi = \frac{P_{sh_{max}}}{P_{sh_{max,fi}}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$\varphi$ : Grau de interação entre a laje e perfil metálico;

$P_{sh_{max}}$ : Força resistente dos conectores de cisalhamento no ponto de momento fletor máximo;

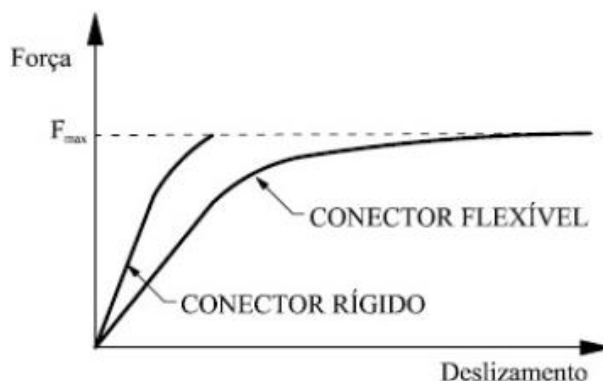
$P_{sh_{max,fi}}$ : Força resistente dos conectores de cisalhamento no ponto de momento fletor máximo para que o deslocamento entre o aço e o concreto seja nulo.

### 2.3 Conectores de cisalhamento

Barbosa (2016, p. 22) caracteriza os conectores de cisalhamento como “[...] dispositivos mecânicos, soldados ou cravados nos perfis metálicos e tem como função resistir às forças que se desenvolvem na interface entre o perfil de aço e o concreto.”

Segundo Kotinda (2006) a classificação dos conectores de cisalhamento é estabelecida conforme a resposta dos mesmos à ação do fluxo de cisalhamento longitudinal, proveniente da interação mista entre o perfil de aço e a laje de concreto. Estes podendo ser classificados em flexíveis ou rígidos. A Figura 7 demonstra a diferença de comportamento entre um conector rígido e um conector flexível.

Figura 7 - Curvas Força x Deslizamento de um conector rígido e outro flexível.



Fonte: Alva (2000).

Um conector flexível porta-se de tal modo que sob carregamento crescente ele continua a se deformar, mesmo atingindo seu valor de resistência máxima, sem que ocorra sua ruptura, permitindo que os conectores vizinhos absorvam mais esforço cortante e alcancem sua capacidade total. Isso possibilita a distribuição igualmente espaçada dos conectores, devido a esse processo de uniformização, sem que haja perda na resistência máxima da conexão (KOTINDA, 2006).

Charter (2015, p. 14) define o conector rígido como aquele “[...] que apresenta pouca deformação e baixo deslizamento entre concreto e aço quando solicitado.”

Apesar do conector flexível possuir ruptura dúctil, o que é desejável, este possui baixo desempenho quando solicitado à fadiga, pois apresenta deformação excessiva durante variação cíclica de carga, contrário ao que ocorre ao conector rígido. Sendo o conector ideal aquele com comportamento rígido sob influência das cargas de serviço e flexível sob influência das cargas dos Estados Limites Últimos (VERÍSSIMO, 2007).

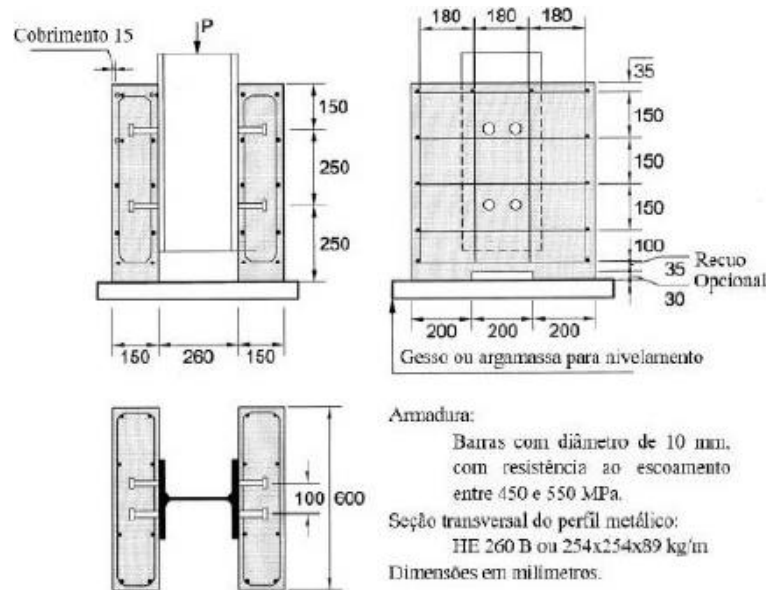
## 2.4 Ensaio de cisalhamento (*push-out*)

Para avaliar o desempenho e as características de um conector de cisalhamento em estruturas mistas de aço-concreto, é realizado o ensaio de cisalhamento direto, *push-out*, normatizado pela EN 1994-1-1:2011. O ensaio consiste, inicialmente, na soldagem dos conectores de cisalhamento em ambos os lados de um perfil metálico. Em seguida são

concretadas, nas faces das mesas do perfil metálico, envolvendo os conectores, duas lajes de concreto armado com dimensões de 60x60x15 cm cada (CHARTER, 2015).

Por fim são aplicadas diferentes cargas sobre a viga, conforme indicado pela letra “P” na Figura 8, mensurando-se os deslizamentos longitudinais apresentados pelo perfil em comparação com a laje. Possibilitando a criação de um gráfico força x deslizamento e de uma análise da ductilidade e resistência dos conectores. Também devendo ser mensurado o distanciamento das lajes, *uplift* (CHARTER, 2015).

Figura 8 – Detalhes do ensaio *push-out* conforme EN 1994-1-1:2011.



Fonte: EN 1994-1-1 (2011).

### 3. ANÁLISE NUMÉRICA

Os ensaios experimentais são imprescindíveis para a análise e para se ter uma melhor compreensão dos comportamentos das estruturas. Já para os conectores de cisalhamento, os ensaios são de extrema importância para validação dos mesmos e para a melhoria da metodologia teórica de cálculo de resistência e ductibilidade.

Gattesco (1999) e Oven et al (1997) demonstraram anteriormente o comportamento estrutural de vigas mistas por meio de modelos matemáticos com equacionamentos custosos, devido à complexidade da análise multiaxial de tensões e deformações. Como apresentado na seção 1.1, vimos que a simulação numérica, quando calibrada, possui grande valor como ferramenta para análise.

#### 3.1 Metodologia

A pesquisa realizada se dá por meio do estudo de uma simulação numérica com base no Método dos Elementos Finitos com um modelo simplificado que represente o comportamento dos conectores de cisalhamentos treliçados. Seguindo como base os ensaios de cisalhamento direto, *push-out*, realizados e publicados por Barbosa (2016) e normatizados pela EN 1994-1-1:2011. Muitos parâmetros e condições utilizadas seguem o modelo criado por Sousa (2019) onde também é feita a simulação por meio de *software* dos ensaios de Barbosa (2016).

A validação dos resultados da modelagem realizada foi feita por meio de comparação entre os resultados obtidos numericamente e os resultados experimentais obtidos por Barbosa (2016) em seus ensaios. Tendo como parâmetros avaliados: deslizamento longitudinal, afastamento transversal (*uplift*), deformação e distribuição de tensões no conector.

Em suma, a pesquisa tem como classificação uma abordagem quantitativa e possui natureza aplicada. E ao que se refere a objetivos, esta pesquisa é classificada como descritiva ao tratar dos procedimentos de estudo de caso.

#### 3.2 Estudo de caso

Os modelos numéricos apresentados neste trabalho foram desenvolvidos de acordo com os ensaios experimentais descritos em Barbosa (2016), detalhes mostrados na Figura 9 e

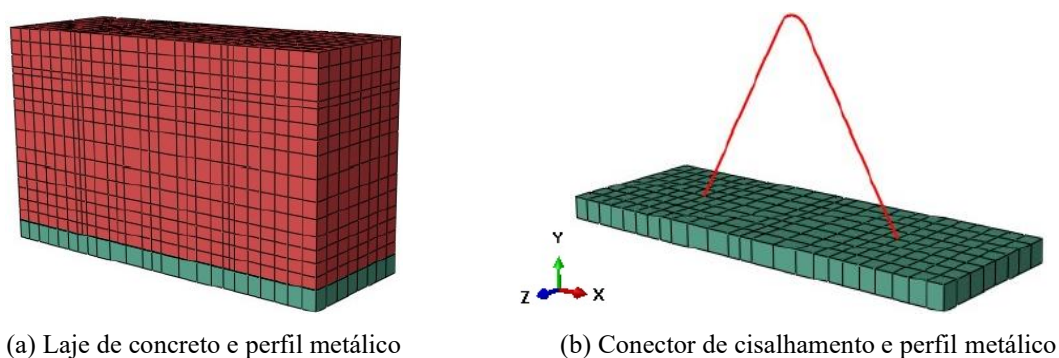




(2019), este trabalho também tomará proveito das condições de simetria na distribuição para utilizar um modelo simplificado com apenas 1 conector, Figura 11.

Este modelo simula uma faixa da laje de 280x150x100 milímetros, uma faixa do perfil metálico de 280x14,2x100 milímetros e um conector treliçado isósceles. Estas faixas de laje de concreto e de perfil metálico tiveram suas dimensões adotadas de acordo com o modelo criado em Sousa (2019).

Figura 11 - Modelo numérico proposto.



(a) Laje de concreto e perfil metálico

(b) Conector de cisalhamento e perfil metálico

Fonte: Autor (2021).

### 3.3 Elementos Finitos adotados

Para os modelos estudados foram utilizados elementos sólidos na laje de concreto e no perfil metálico, enquanto que no conector de cisalhamento foram utilizados elementos de viga. Estes elementos sólidos e elementos de viga são elementos pré-definidos e disponibilizados pela biblioteca do *software* utilizado na simulação. Para a escolha dos elementos sólidos, assim como Sousa (2019), foi levada em consideração: esforço computacional demandado, os graus de liberdade, família do elemento pertencente, número de nós e o comportamento a ser simulado.

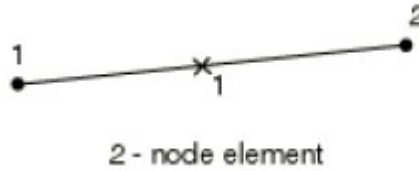
#### 3.3.1 Elemento B31

Este elemento, Figura 12, foi utilizado para simular os conectores de cisalhamento por ser simples, mas ainda assim representar de forma suficiente o modelo simulado. Além disso responde bem à esforços de flexão e as tensões ao longo de seu comprimento.

Este elemento ainda permite a definição da seção transversal do elemento, que é essencial na diferenciação de diâmetros entre conectores, e trata-se de um elemento de viga

tridimensional. Possui dois nós e seis graus de liberdade por nó, referente as translações e rotações nos eixos x, y e z.

Figura 12 - Elemento B31 mostrando numeração dos dois nós e ponto de integração.

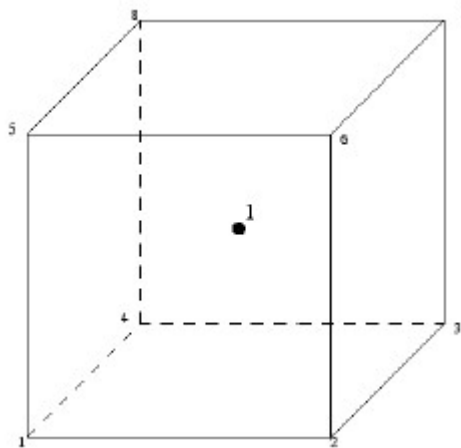


Fonte: SIMULIA (2009).

### 3.3.2 Elemento C3D8R

Este elemento, Figura 13, foi utilizado para simular o perfil de aço e a laje de concreto. Sua escolha se dá devido ao mesmo permitir simular as concentrações de tensões junto aos conectores de cisalhamento. É um elemento linear de uso geral, com integração em 1 ponto, possui 8 nós, cada nó com 3 graus de liberdade, referentes às translações segundo os eixos x, y e z.

Figura 13 - Elemento C3D8R com numeração de nós e ponto de integração.



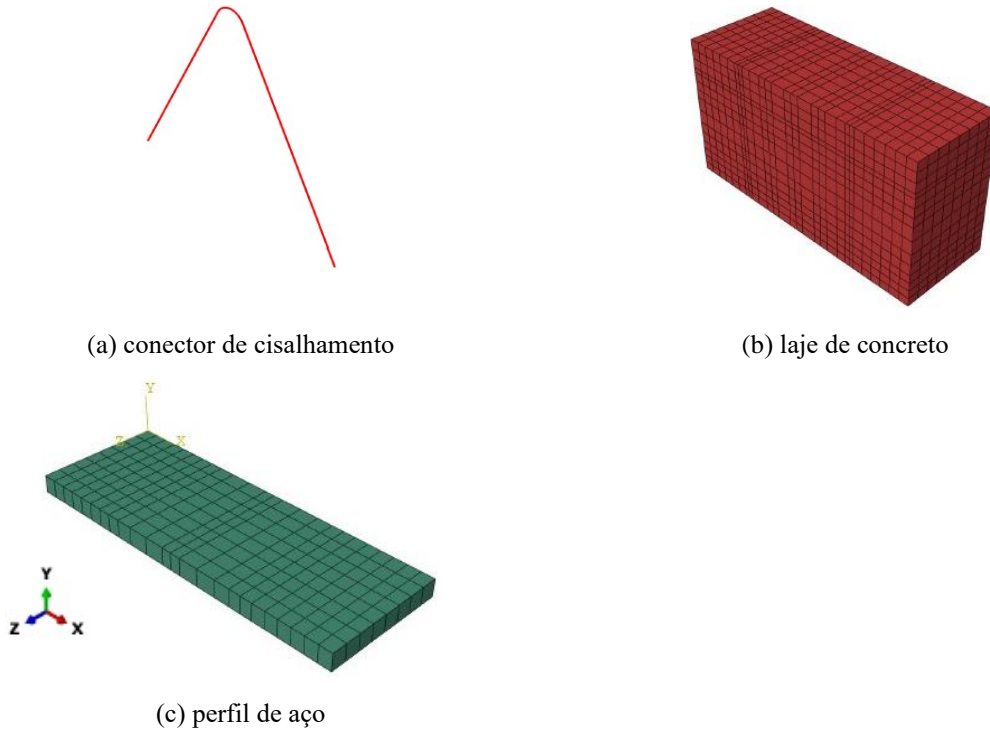
Fonte: SIMULIA (2009).

## 3.4 Definição da malha de elementos finitos

Os modelos são constituídos por 3 componentes: conector de cisalhamento, laje de concreto e perfil metálico, Figura 14. Os componentes foram criados separadamente e suas malhas foram pensadas de modo a existir pontos coincidentes, já pensando em facilitar e otimizar as interações e acoplamentos.

A simplificação realizada serve para reduzir o número de elementos e, consequentemente, o tempo e o esforço computacional necessário para a simulação. Também foi desenvolvida de forma que seus resultados se apresentem de forma satisfatória se comparados àqueles referentes ao modelo inteiro com os 8 conectores.

Figura 14 - Elementos do modelo de elementos finitos (modelo reduzido).



Fonte: Autor (2021).

### 3.4.1 Discretização do conector de cisalhamento adotado

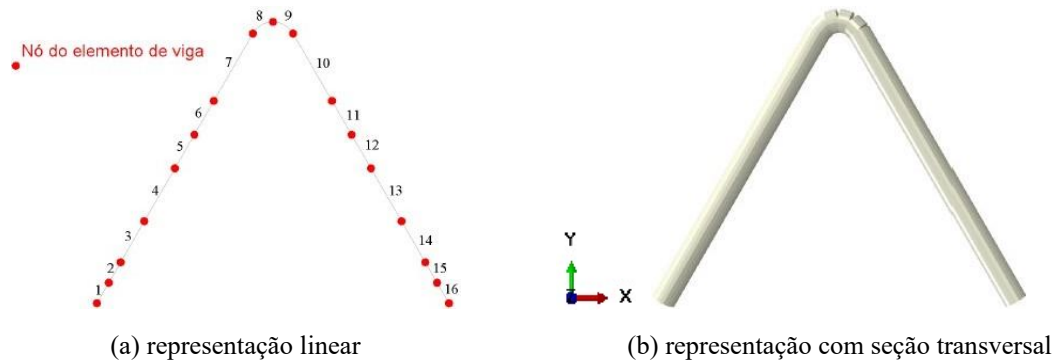
Para a discretização do conector de cisalhamento foram utilizados dezesseis elementos de viga do tipo B 31, Figura 15. O elemento utilizado como já dito anteriormente possui dois nós, um em cada extremidade e seis graus de liberdade em relação aos deslocamentos e rotações nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Sousa (2019) usa apenas cinco elementos de viga em sua análise devido à necessidade da transferência dos esforços cisalhantes que atuam principalmente na parte inferior do conector sobre a laje.

Porém, durante a criação deste trabalho observou-se uma maior necessidade de nós na parte inferior. Pois foi observado que, durante a fase elástica do conector, isso culminava em resultados mais próximos em relação aos de Barbosa (2016).

O maior número de nós no conector torna a deformada do mesmo mais fiel à realidade, pois o elemento (B 31) só apresenta deformação na direção axial. Sendo assim as curvas geradas pelas deformações por flexão, no conector, dependem dos nós entre elementos.

Figura 15 - Conector de cisalhamento discretizado

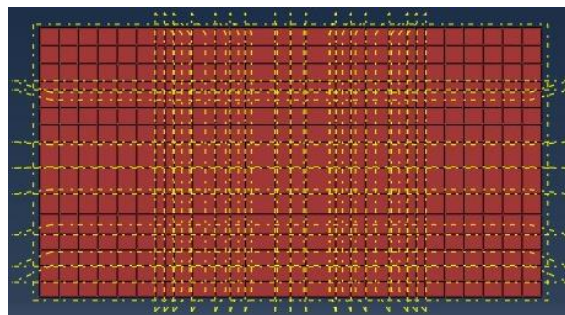


Fonte: Autor (2021).

### 3.4.2 Discretização da laje de concreto

Para a discretização da laje de concreto foram usados *datum planes* nos planos  $xz$  e  $yz$  para criar partições no componente, com a intenção de criar nós coincidentes entre a laje de concreto e o conector de cisalhamento. Facilitando e tornando mais preciso os seus acoplamentos. Os *datum planes* criados são representados pelas linhas tracejadas na Figura 16.

Figura 16 - Discretização da laje de concreto.



(a) laje discretizada e com *datum planes* a mostra



(b) corte na seção longitudinal da laje com conector destacado



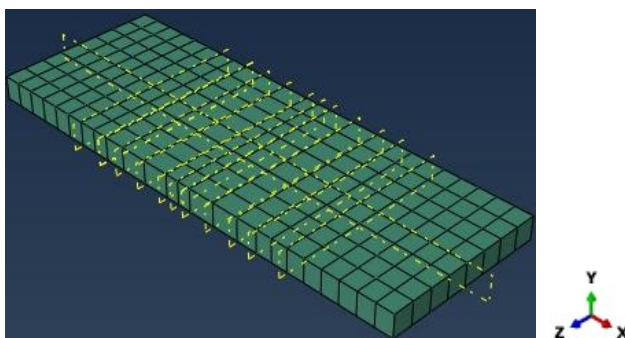
(c) vista superior da laje com conector destacado

Fonte: Autor (2021).

### 3.4.3 Discretização do perfil metálico

Assim como feito na laje de concreto, o perfil metálico foi particionado com os *datum planes*, Figura 17, de forma a criar pontos coincidentes com o conector e em conformidade com a laje de concreto.

Figura 17 - Perfil metálico discretizado e com *datum planes* a mostra.



Fonte: Autor (2021).

### 3.5 Condições de contorno e aplicação do carregamento

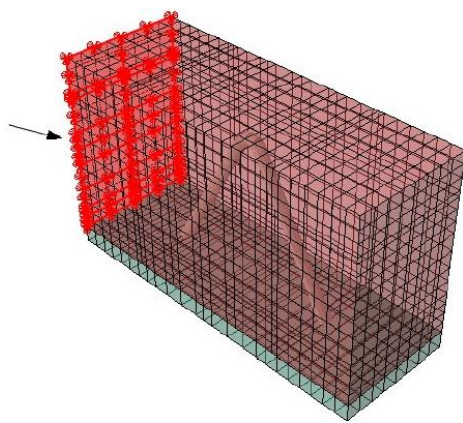
As condições de contorno e a aplicação das cargas no modelo numérico visam recriar e reproduzir as que ocorreram durante os ensaios de cisalhamento direto realizados por Barbosa (2016) em laboratório.

Primeiramente a face inferior da laje foi restringida nas translações em x, y e z, Figura 18 (a). Em seguida as faces laterais da laje de concreto e do perfil metálico foram restringidos nas translações no eixo z, Figura 18 (b), para restringir as deformações nesse sentido, de modo a concentrar as deformações na direção x e y, onde serão avaliados os deslizamentos longitudinais e *uplift*, respectivamente. A Figura 18 (c) mostra a restrição nas translações nos eixos y e z na face de baixo do perfil metálico.

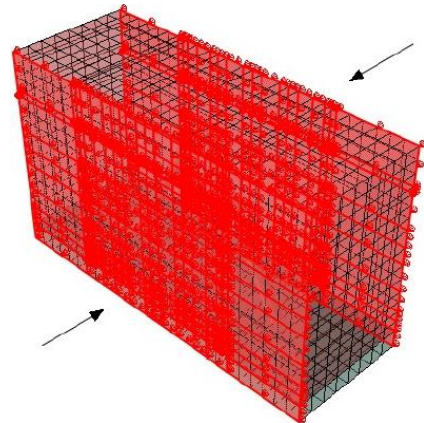
Ainda com relação às condições de contorno aplicadas, tem-se a utilização da propriedade *frictionless* entre a face de cima do perfil e a face de baixo da laje, Figura 18 (d), propriedade essa que retira o atrito entre essas duas faces.

A aplicação dos carregamentos no perfil ocorreu na face superior do mesmo como indicado na Figura 18 (e) e por meio dos conectores são transferidos para a laje de concreto, assim como ocorre na realidade.

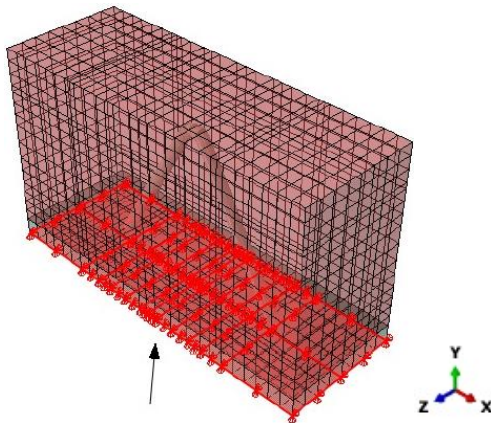
Figura 18 - Condições de contorno e aplicações do carregamento



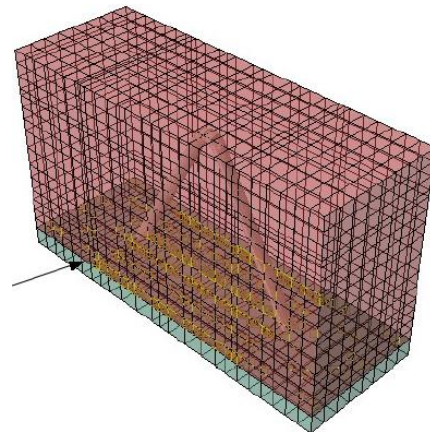
(a) restrição na face inferior da laje de concreto



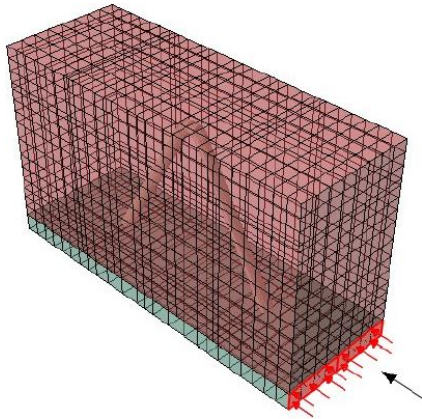
(b) restrição nas faces laterais da laje e perfil



(c) restrição na face de baixo do perfil metálico



(d) *frictionless* entre laje e perfil

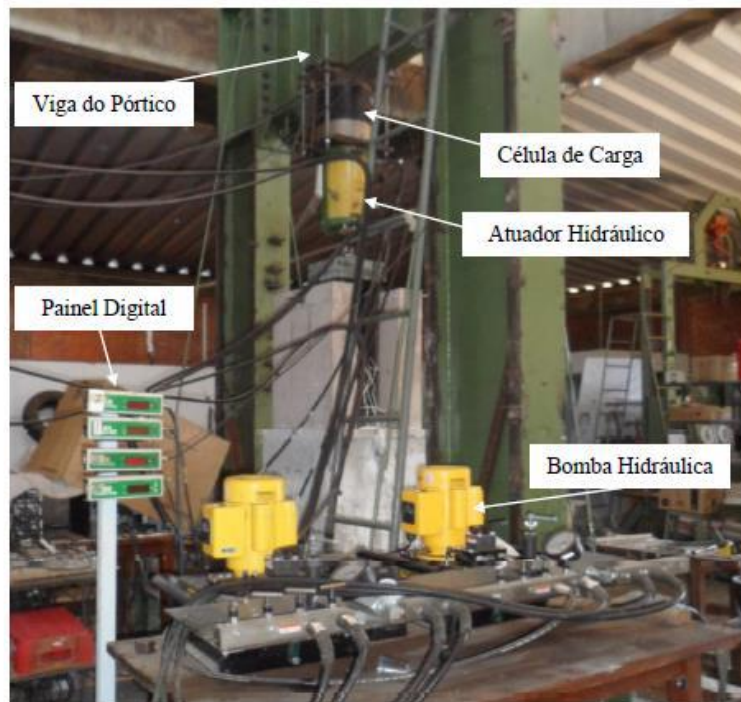


(e) aplicação do carregamento no perfil metálico

Fonte: Autor (2021).

A Figura 19 ilustra os sistemas utilizados por Barbosa (2016) para aplicação dos carregamentos e obtenção dos dados experimentais durante a execução do ensaio de cisalhamento direto.

Figura 19 - Sistema de aquisição de dados de carregamento e bombas hidráulicas para aplicação de cargas



Fonte: Barbosa (2016).

### 3.6 Acoplamentos/Vínculos entre elementos

As relações de acoplamentos e vinculações, de baixo para cima no modelo, estão descritas a seguir:

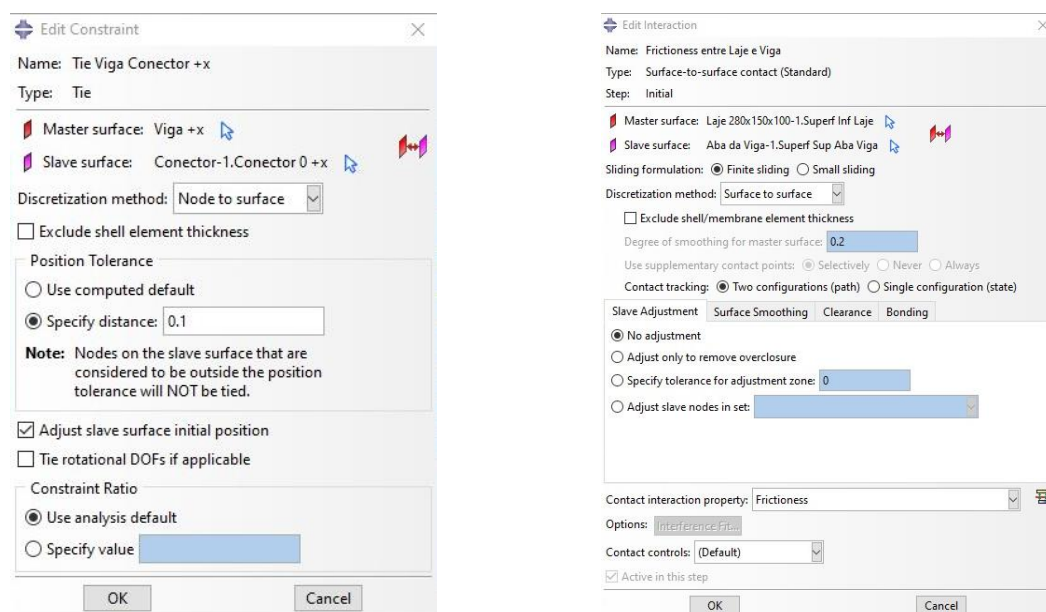
- Perfil e conector de cisalhamento: através do compartilhamento de nós e das partições criadas utilizando os *datum planes*, dois nós do perfil metálico correspondem aos nós da base das duas pernas do conector, e utilizando a restrição *tie* (Figura 20 a). Caracterizando o engastamento que seria realizado pela solda entre conector e perfil metálico no modelo experimental.
- Perfil e laje de concreto: como dito anteriormente, Figura 18 (d), foi utilizada a propriedade *frictionless* (Figura 20 b), representando assim a graxa que é utilizada no modelo experimental para reduzir a aderência que possa existir entre o perfil e a laje.
- Laje de concreto e conector de cisalhamento: foi utilizada a restrição *coupling* (Figura 20 c) em cada um dos nós do conector com os nós correspondentes da laje de modo a gerar acoplamento dos elementos nas direções x, y e z, representados no *software* como 1, 2 e 3 respectivamente.

A restrição *tie* (amarrar) permitem prender duas regiões para que não haja movimento relativo entre elas.

A restrição *coupling* (acoplamento) funciona de forma semelhante, mas permitindo um maior controle na escolha das restrições de translações, chamada de U no programa, e rotações, UR no programa, entre as duas regiões ou nós escolhidos.

Já a interação de contato *frictionless*, como dito anteriormente, permitem que as duas regiões possam deslizar livremente sem atrito entre elas.

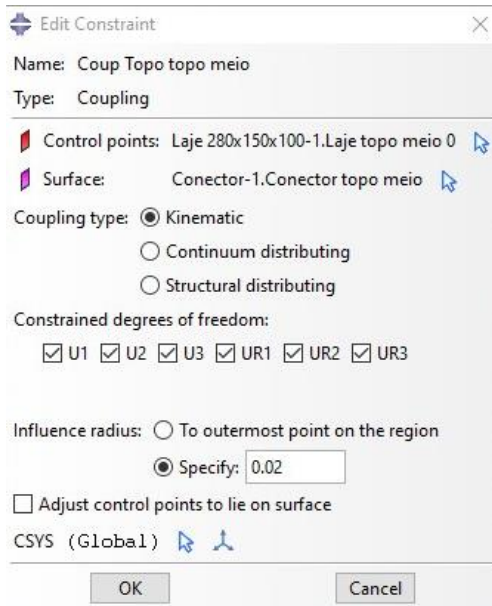
Figura 20 - Interface do programa utilizado na edição de propriedade de interação e de restrição.



(a) restrição *tie*

(b) interação de contato *frictionless*



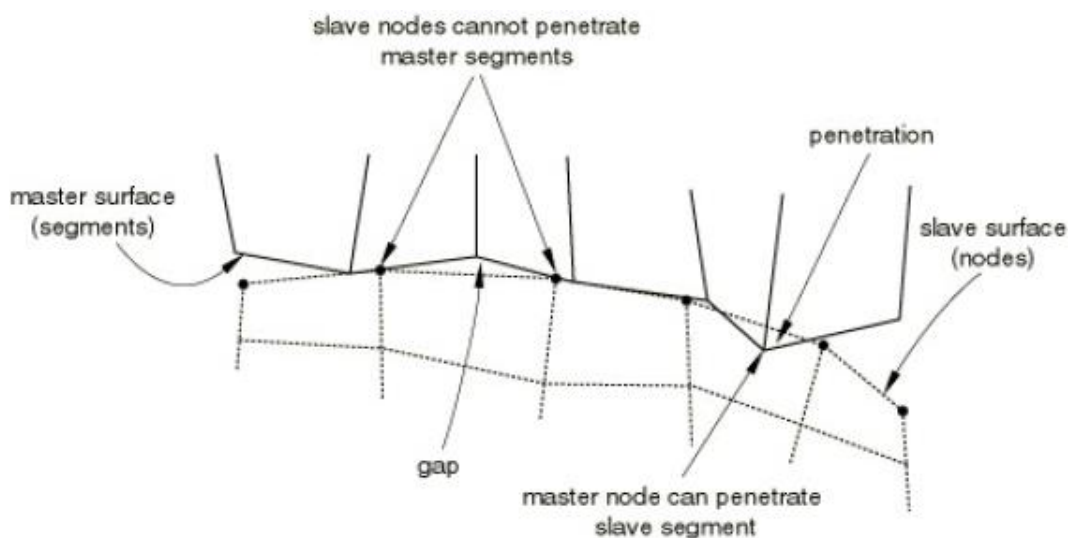
(c) Restrição *coupling*

Fonte: Autor (2021).

De acordo com Sousa (2019) apud SIMULIA (2009) a definição das superfícies de contato conhecidas como *master-slave* é feita considerando que os nós da superfície *slave* interagem com os nós da superfície *master*.

De tal forma que os nós da superfície *master* podem, a princípio, adentrar na superfície *slave* sem nenhum impedimento. Configurando assim a região *master* com uma região rígida e a *slave* uma região flexível, esta interação pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 - Interação entre superfície *master-slave*.

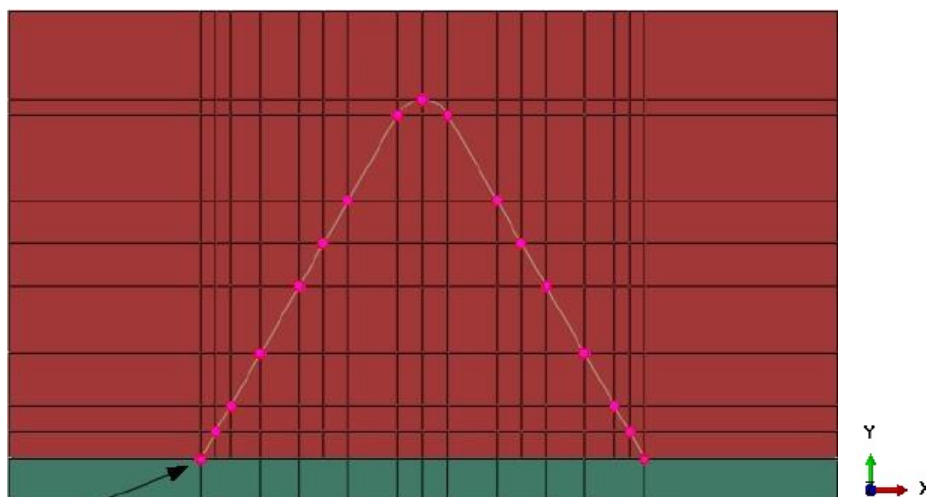


Fonte: SIMULIA (2009).

Na propriedade de restrição *tie*, a região *master* são os nós do perfil metálico e os do conector a região *slave*. Na interação de contato *frictionless* a face do perfil metálico é a

região *master* e a face da laje de concreto a região *slave*. Para a restrição *coupling*, os nós da laje são considerados a superfície *master* e os do conector a superfície *slave*, como mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Os nós de cor rosa indicam restrição *tie* e *coupling*.



Fonte: Autor (2021).

Foram testadas, durante o desenvolvimento deste trabalho, diversas configurações de acoplamento, procurando-se a que mais representasse o modelo real, de acordo com os parâmetros ditos, mas que ainda permitisse a utilização deste trabalho como modelo para pesquisas futuras. Essa busca resultou na criação de dois modelos, aqui chamados de E1 e E2 para melhor compreensão.

O *coupling* do modelo E1, em todos os diâmetros de conector, tem os nós 1, 2 e 3, Figura 23, modificado, apenas nesses nós, de modo que as rotações nos eixos x, y e z não são compartilhadas entre laje e conector.

Já o modelo E2, para que possa ter comportamento mais próximo ao apresentado pelos modelos experimentais segue a seguinte construção.

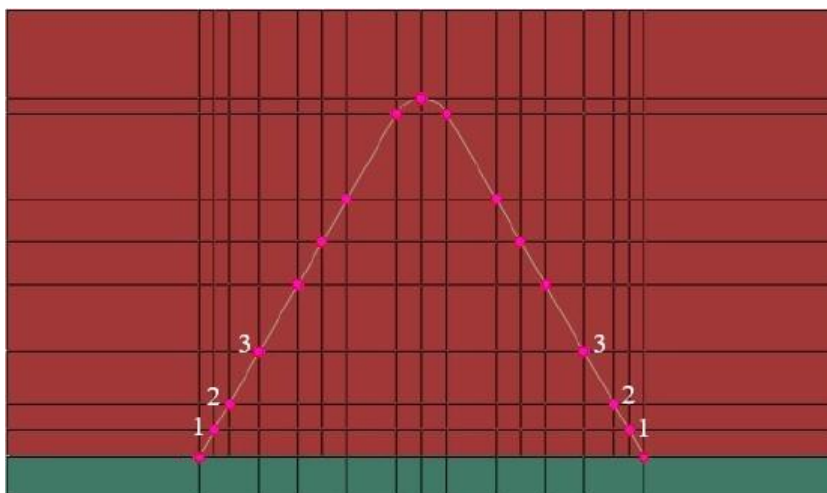
Para os diâmetros de 10 e de 12,5 milímetros até o carregamento de 300 kN o *coupling* de todos os nós estava configurado como mostrado na Figura 20 (c).

Porém para simular o desprendimento que ocorre entre o conector e o concreto durante o ensaio e para tornar a curva da fase plástica de resultados mais suave, alguns nós com a propriedade *coupling* tiveram as rotações liberadas nos eixos x, y e z.

Esse desprendimento ocorreu primeiramente no carregamento de 400 kN na propriedade *coupling* dos nós indicados como 1, no carregamento de 600 kN foram liberados também os nós 2 e finalmente no carregamento de 800 kN foram liberados os nós 3, a numeração segue como ilustrado na Figura 23.

Para o conector de 8 milímetros foi utilizado o mesmo procedimento, diferindo apenas os carregamentos em que foi realizada a mudança na propriedade, sendo estes 200 kN, 400 kN e 600 kN, respectivamente. Esta medida foi tomada pelos mesmos motivos já colocados.

Figura 23 - Numeração dos nós onde *coupling* será modificado durante simulação.



Fonte: Autor (2021).

Essa construção do modelo E2 se deu pela análise das curvas geradas pelos resultados experimentais. Onde os carregamentos em que essas curvas apresentavam aumento na sua inclinação tornaram-se os carregamentos em que as rotações nos nós enumerados foram liberadas.

Devido essas diferenças de acoplamentos, inicialmente o modelo E2 apresenta-se mais rígido que o modelo E1. De acordo com o prosseguimento do ensaio as suas condições de acoplamento se aproximam e, por tanto, seus resultados também se aproximam. Até que, por fim, tornam-se iguais quando as condições de acoplamentos do modelo E2 igualam-se às do modelo E1.

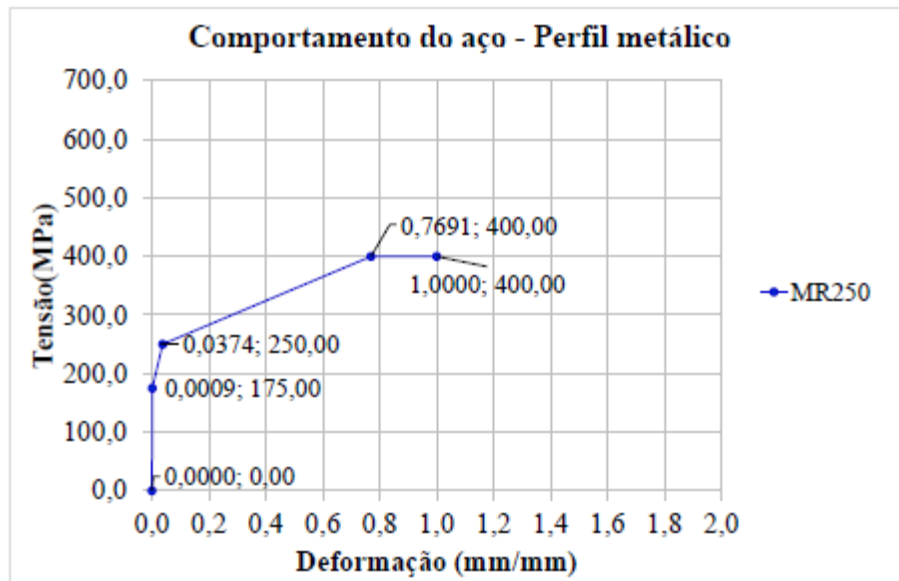
### 3.7 Propriedades dos materiais

O *software* utilizado possui a característica de separar as propriedades de comportamento do material. De modo que para todos os materiais foram definidas características para a fase elástica e fase plástica.

### 3.7.1 Perfil metálico

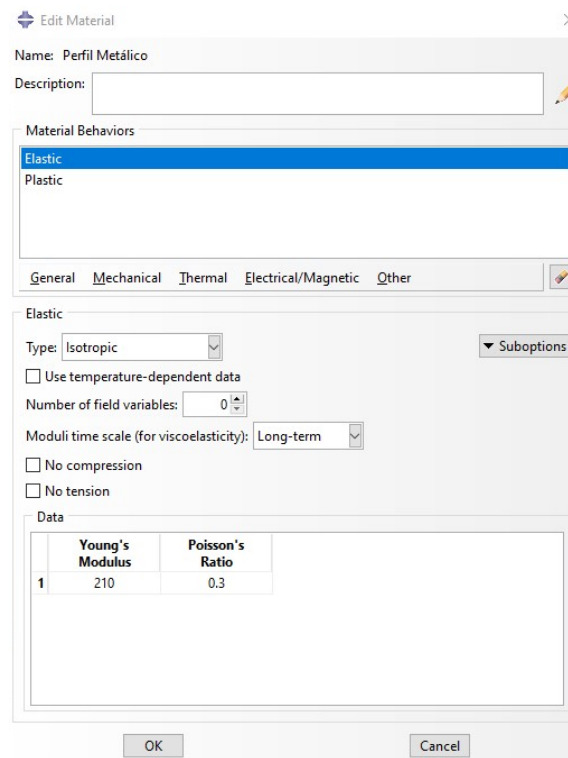
Cavalcante (2010) fez a caracterização do perfil metálico através do gráfico da curva tensão x deformação, Figura 24. Assim para a fase elástica do mesmo, foi utilizado na simulação numérica 210 GPa como módulo de Young (E) e 0,30 como coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), Figura 25.

Figura 24 - Curva tensão x deformação do perfil metálico.



Fonte: Cavalcante (2010).

Figura 25 - Características elásticas do perfil metálico.



Fonte: Autor (2021).

Para a caracterização do comportamento do material na fase plástica o *software* necessita de um impute de dados contendo a tensão real aplicada e a deformação plástica.

Inicialmente foi definido que a fase plástica do material iniciaria um pouco antes do segundo ponto (0,0009;175) da Figura 24. Isto foi feito, pois a primeira linha da tabela imputada deve começar com a deformação plástica tendo valor igual a 0 (zero).

Em seguida através das seguintes equações encontradas em SIMULIA (2009) foram-se obtidos a tensão real, Equação 3, e a deformação plástica, Equação 4.

$$\sigma_{\text{real}} = \sigma_{\text{nom}}(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (\text{Eq. 3})$$

$\sigma_{\text{real}}$ : Tensão real;

$\sigma_{\text{nom}}$ : Tensão nominal;

$\varepsilon_{\text{nom}}$ : Deformação nominal.

$$\varepsilon_{\text{pl}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) - \frac{\sigma_{\text{real}}}{E} \quad (\text{Eq. 4})$$

$\varepsilon_{\text{pl}}$ : Deformação plástica;

$\varepsilon_{\text{nom}}$ : Deformação nominal;

$\sigma_{\text{real}}$ : Tensão real.

A Figura 26 ilustra os dados de tensão real e deformação plástica imputados no *software*.

Figura 26 - Impute de dados da fase plástica do perfil metálico.

The screenshot shows the 'Edit Material' dialog box with the following details:

- Name: Perfil Metálico
- Description: (empty)
- Material Behaviors: Elastic, Plastic (selected)
- General | Mechanical | Thermal | Electrical/Magnetic | Other
- Plastic:
  - Hardening: Isotropic
  - Use strain-rate-dependent data
  - Use temperature-dependent data
  - Number of field variables: 0
- Data Table:
 

	Yield Stress	Plastic Strain
1	0.174	0
2	0.1751575	0.000198965
3	0.25935	0.035680183
4	0.70764	0.567640383
5	0.8	0.689947181

Fonte: Autor (2021).

### 3.7.2 Conectores de cisalhamento

Barbosa (2016) realizou diversos estudos para caracterizar os vergalhões de aço CA-50 utilizados na montagem dos conectores utilizados no experimento de cisalhamento direto, *push-out*. Obtendo valores para os módulos de Young que foram utilizados para definir o comportamento elástico do material na simulação numérica no *software*.

Os valores utilizados como módulo de Young em cada conector estão descritos na Tabela 1, o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) utilizado foi de 0,30.

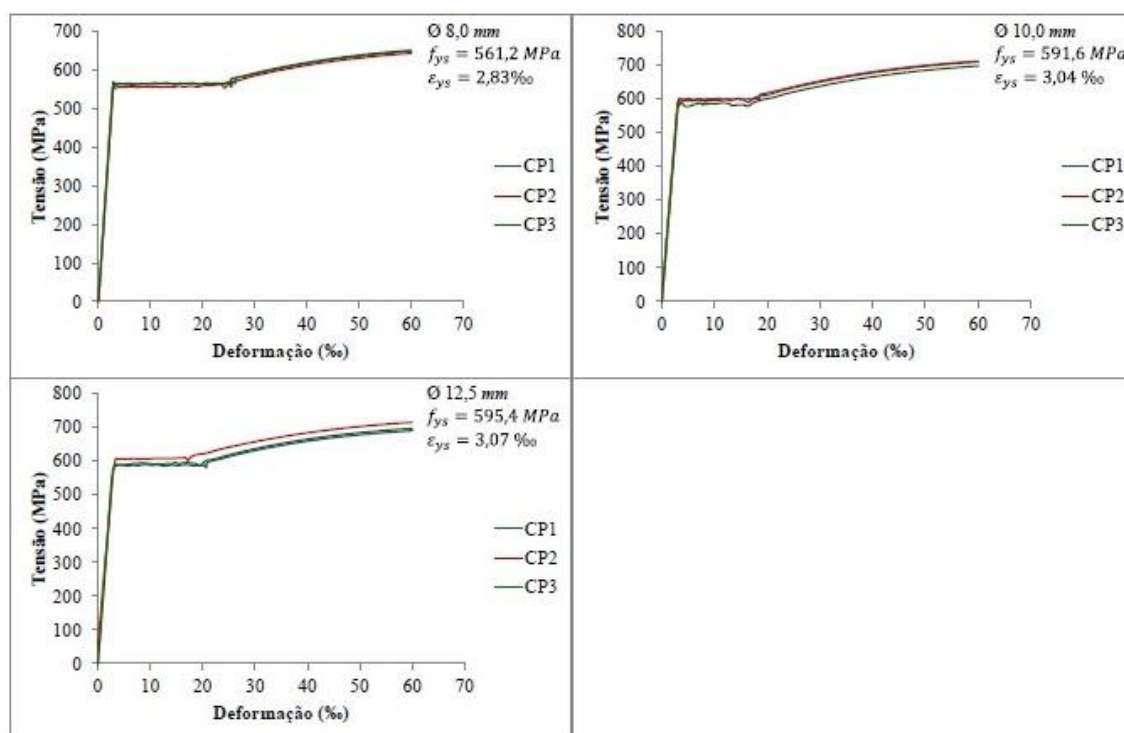
Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos conectores obtidas experimentalmente.

Material	Módulo de Young (E)
CA-50 Ø8,0	198,4 GPa
CA-50 Ø10,0	194,5 GPa
CA-50 Ø12,5	195,3 GPa

Fonte: Adaptado Barbosa (2016).

Para o impute de dados no programa de forma que o mesmo simule corretamente a fase plástica do conector, foram utilizados os dados de tensão x deformação obtidos por Barbosa (2016), Figura 27.

Figura 27 - Curvas tensão x deformação do aço CA-50 obtidas experimentalmente.



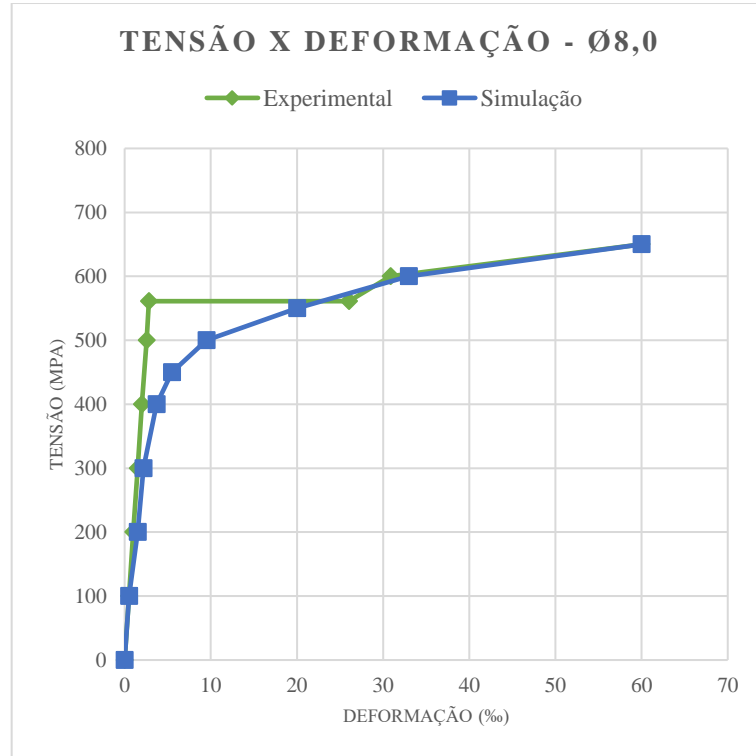
Fonte: Adaptado Barbosa (2016).

Em seguida para os conectores de Ø8,0, Ø10,0 e Ø12,5 foram criadas curvas de tensão x deformação de forma que a passagem do regime elástico para o regime plástico fosse mais suave, de modo a facilitar o processo de convergência do modelo numérico e diminuir o tempo de processamento. Mudanças bruscas nos gráficos de caracterização dos materiais, como as da Figura 27 demandam maior tempo de processamento.

Logo abaixo no Gráfico 1 e Gráfico 2 estão as curvas criadas para suavizar a passagem do regime elástico para o regime plástico. Uma observação importante é que para os conectores de Ø10,0 e Ø12,5 foi utilizada a mesma curva, pois ambos possuem comportamento

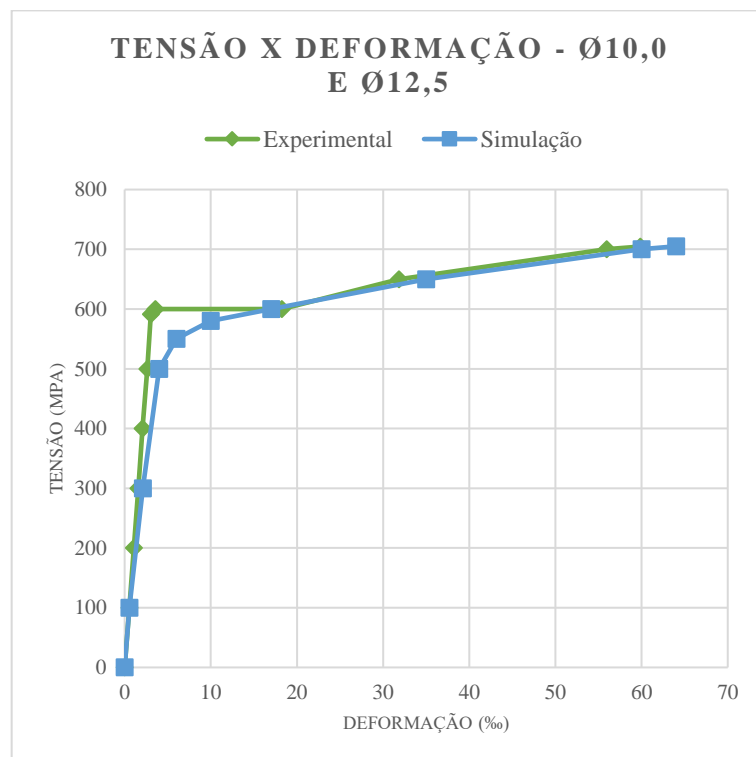
similar em relação as suas curvas de tensão x deformação verificadas por meio dos ensaios experimentais.

Gráfico 1 – Curvas de tensão x deformação para conector de Ø8,0.



Fonte: Autor (2021) e adaptado Barbosa (2016).

Gráfico 2 – Curvas de tensão x deformação para conectores de Ø10,0 e Ø12,5.

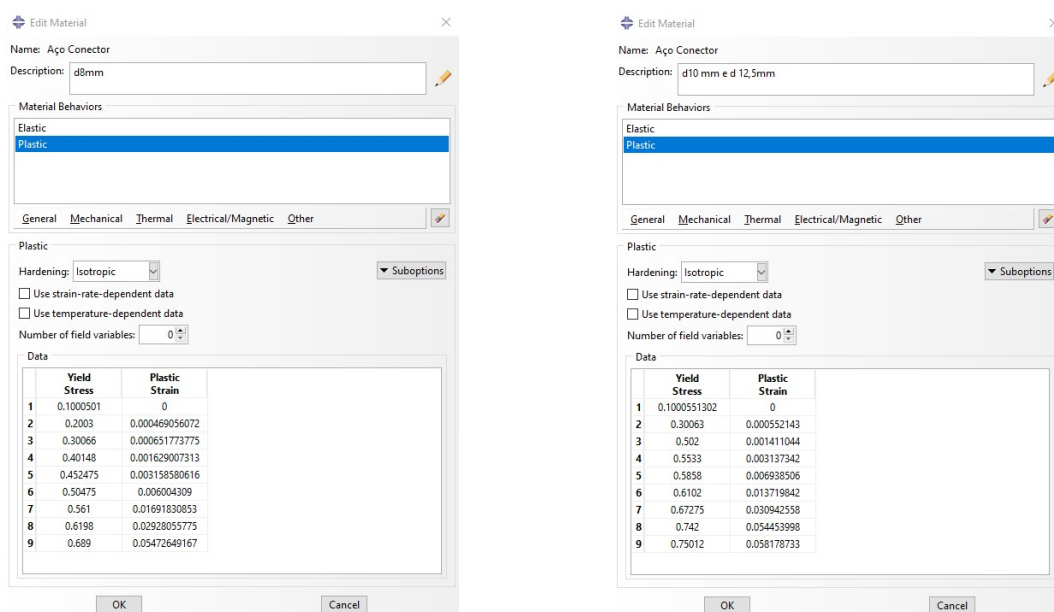


Fonte: Autor (2021) e adaptado Barbosa (2016).



Além desta suavização ainda é necessário calcular através das equações 3 e 4 as tensões reais e deformações plásticas. A Figura 28 (a) e (b) ilustra os valores de tensão real e deformação plástica utilizadas na simulação. Foi escolhido como início da fase plástica a tensão de 100 MPa para que a suavização da curva tensão x deformação pudesse ser realizada de forma mais suave possível.

Figura 28 - Impute de dados da fase plástica dos conectores de cisalhamento.



(a) dados usados em Ø8,0

(b) dados usados em Ø10,0 e Ø12,5

Fonte: Autor (2021).

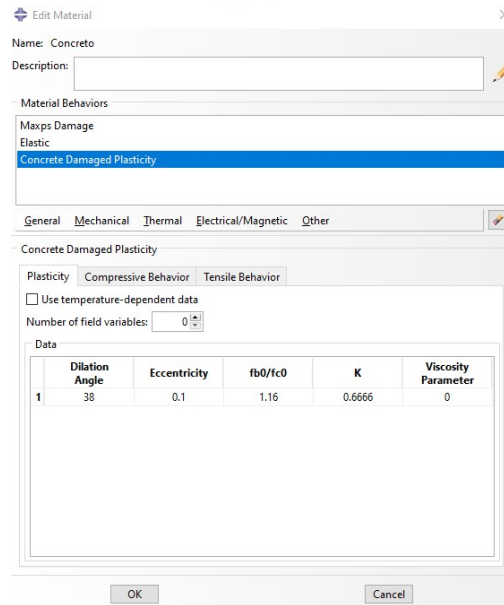
### 3.7.3 Laje de concreto

No trabalho de Barbosa (2016), estão caracterizadas, por meio de ensaios experimentais, as propriedades do concreto utilizado nas lajes. Assim o impute de dados para a fase elástica se deu com o módulo de Young com 26 GPa e coeficiente de Poisson de 0,2.

Já para a fase plástica, foi utilizado dos dados obtidos por Barbosa (2016) a resistência à tração por compressão diametral de 3,6 MPa.

Também foi utilizado o modelo *concrete damaged plasticity* (CDP), inicialmente proposto por Lubliner et al (1988) e que posteriormente incorporou as modificações definidas por Lee e Fenves (1998) para expressar os efeitos de cargas cíclicas. Sarturi (2014) coloca que os dados usuais ao modelo CDP são: a razão entre as tensões de escoamento no ensaio equibiaxial e no ensaio uniaxial como 1,16, representado na Figura 29 como  $f_{b0}/f_{c0}$ , a excentricidade como 0,1, a razão entre a distância do eixo hidrostático ao meridiano de tração e de compressão no plano desviador como 2/3, K na Figura 29, a viscosidade como 0 (zero) e o ângulo de dilatação como 38°.

Figura 29 - Dados utilizados para que o programa possa simular a fase plástica do concreto usado na laje.



Fonte: Autor (2021).

Também se fez necessário traçar o comportamento do material em relação à compressão. Sendo previsto por meio do modelo constitutivo do tipo multilinear com encruamento isótropo retirado do Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1:2001). De acordo com a última referência, o comportamento a compressão do concreto seguirá a seguinte relação:

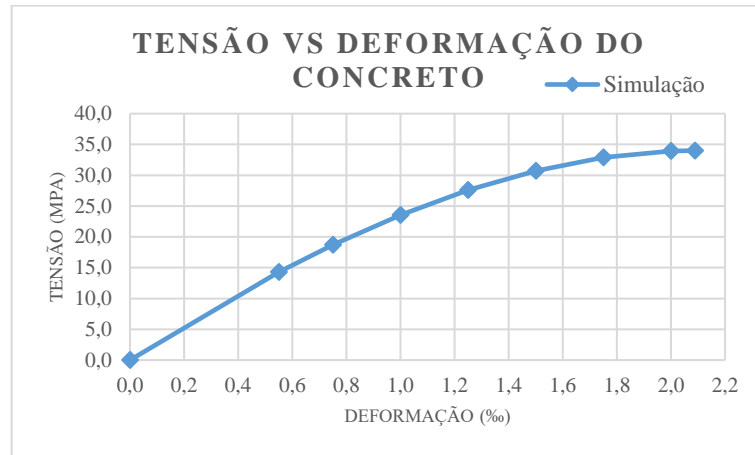
$$\sigma = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}, \text{ para } 0 < \varepsilon < \varepsilon_{cl} \quad (\text{Eq. 5})$$

Equivalendo para a equação 5:

$$\eta = \varepsilon / \varepsilon_{cl} \quad \varepsilon_{cl} (\%) = 0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,8 \quad k = 1,1 E_{cm} |\varepsilon_{cl}| / f_{cm}$$

Sendo  $f_{cm}$  o valor médio de resistência à compressão do concreto para o corpo de prova cilíndrico,  $\varepsilon_{cl}$  a deformação correspondente à tensão máxima de compressão e  $E_{cm}$  o módulo secante de elasticidade do concreto, de acordo com Kotinda (2006), criando uma curva de tensão x deformação ilustrada no Gráfico 3.

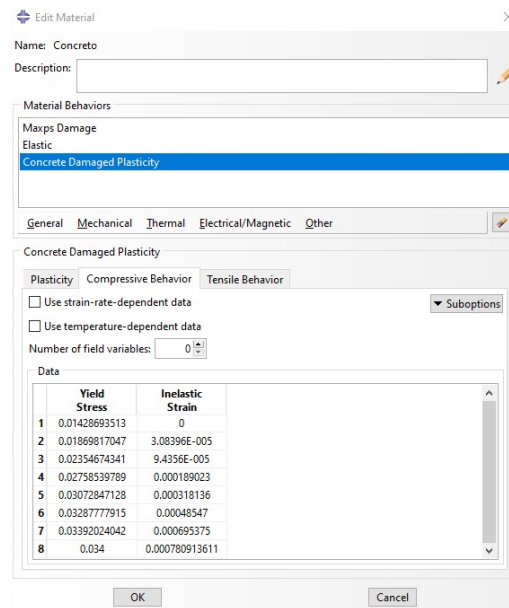
Gráfico 3 - Curva tensão x deformação utilizada no concreto da simulação.



Fonte: Autor (2021).

Com a equação 5 foi possível a obtenção da tensão nominal e da deformação nominal, convertidas em tensão real e deformação plástica com as equações 3 e 4, respectivamente. A Figura 30 ilustra a tensão real e deformação plástica inseridas no *software*.

Figura 30 - Impute de dados para simulação do comportamento a compressão do concreto.



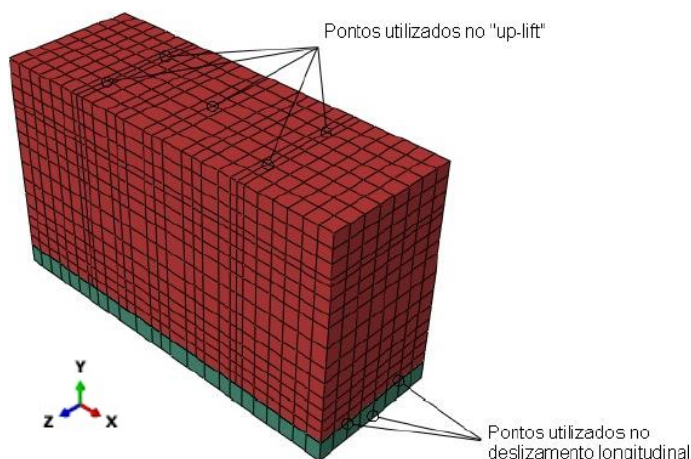
Fonte: Autor (2021).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente no item 4.1, para a validação do modelo numérico, foi-se avaliado o deslizamento longitudinal do perfil de acordo com a carga aplicada. Após isso, no item 4.2, foi avaliado o afastamento transversal da laje em relação ao perfil, *uplift*. Em seguida, no item 4.3, foi avaliada a distribuição de tensões, pelo método de Von Mises, no perfil e nos conectores de cisalhamento. E por fim, avaliou-se as deformadas dos conectores e sua distribuição de tensões, no eixo XX, item 4.4.

Os pontos utilizados para verificação do *uplift* e do deslocamento longitudinal estão representados conforme indicados na Figura 31. Sendo os pontos para *uplift* selecionados da malha da face de cima da laje e os de deslocamento longitudinal da malha da face do perfil.

Figura 31 - Pontos utilizados para aquisição de deslocamentos.



Fonte: Autor (2021).

Assim como Sousa (2019) o deslocamento para cada carregamento é obtido por meio da média dos deslocamentos em cada ponto selecionado. Resumindo, a média dos três valores de deslocamento no eixo 'x' para o deslocamento longitudinal, e a média dos 5 valores de deslocamento no eixo 'y' para o deslocamento transversal, *uplift*.

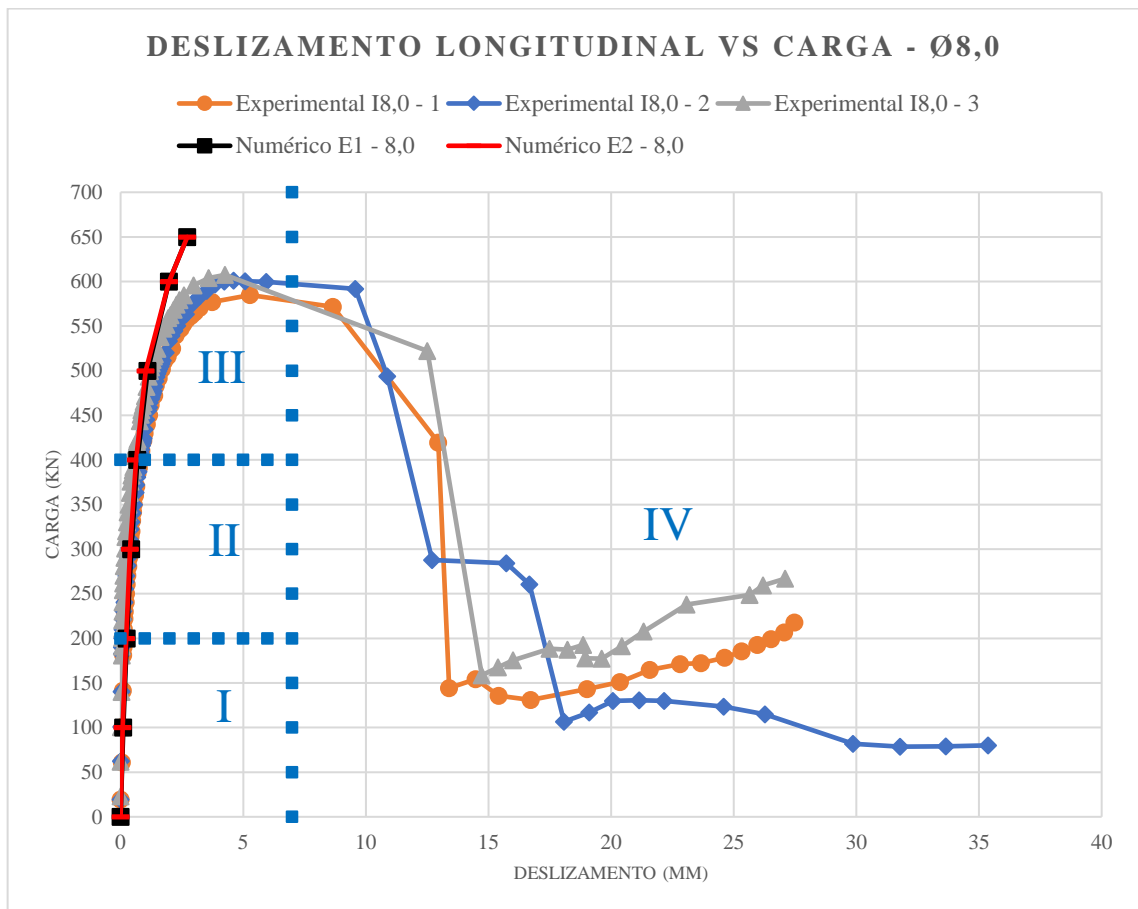
### 4.1 Deslizamento longitudinal

Os gráficos a seguir descrevem a variação de deslocamento longitudinal da face do perfil em função do carregamento aplicado. E eles tem como objetivo permitir a aferição entre as curvas encontradas por Barbosa (2016) em seus ensaios experimentais e os valores numéricos obtidos por este trabalho.

Para fácil entendimento as curvas identificadas com a nomenclatura “I” pertencem a Barbosa (2016) e as de nomenclaturas “E1” e “E2” pertencem aos modelos numéricos explicados no item 3.6.

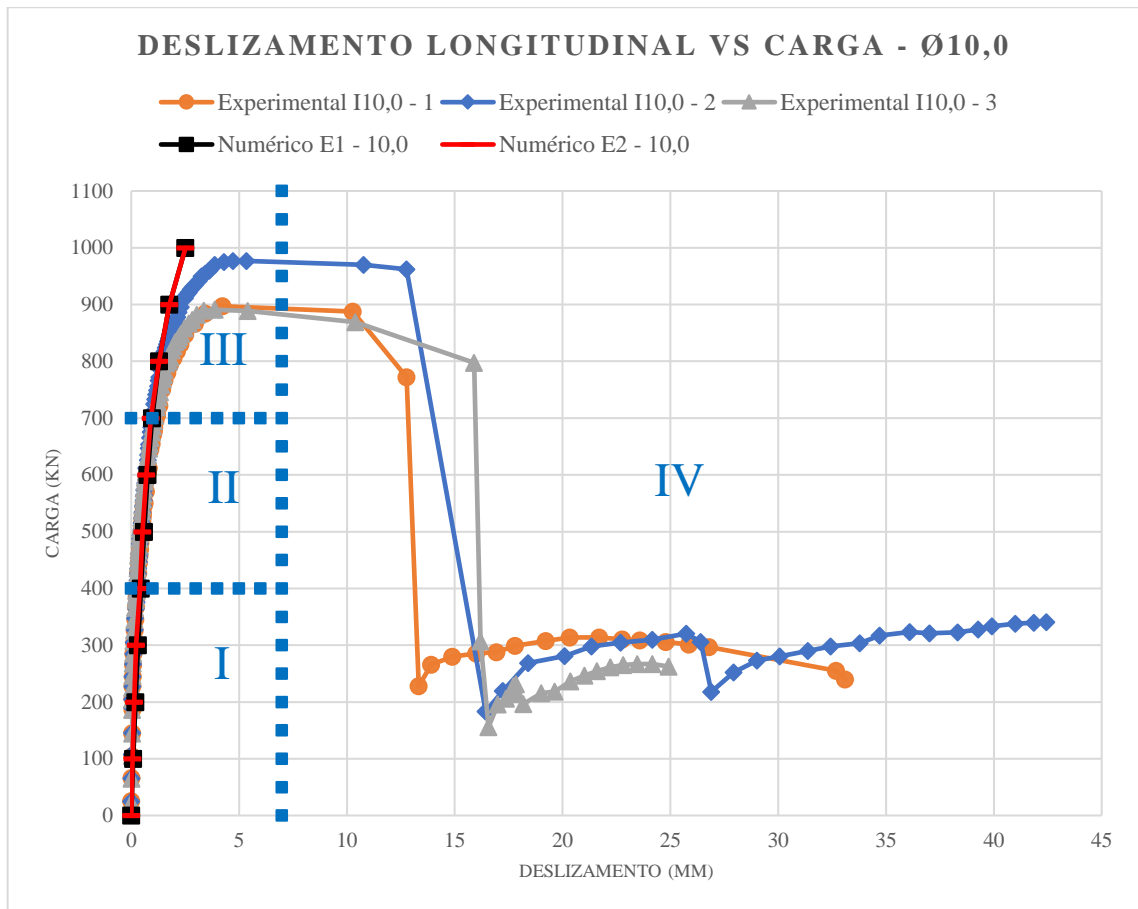
De acordo com os parâmetros de materiais e restrições inseridos na criação do modelo numérico, o comportamento resultou em um grau de interação total, elucidado no item 2.2.1.2.2.

Gráfico 4 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 8,0 mm.



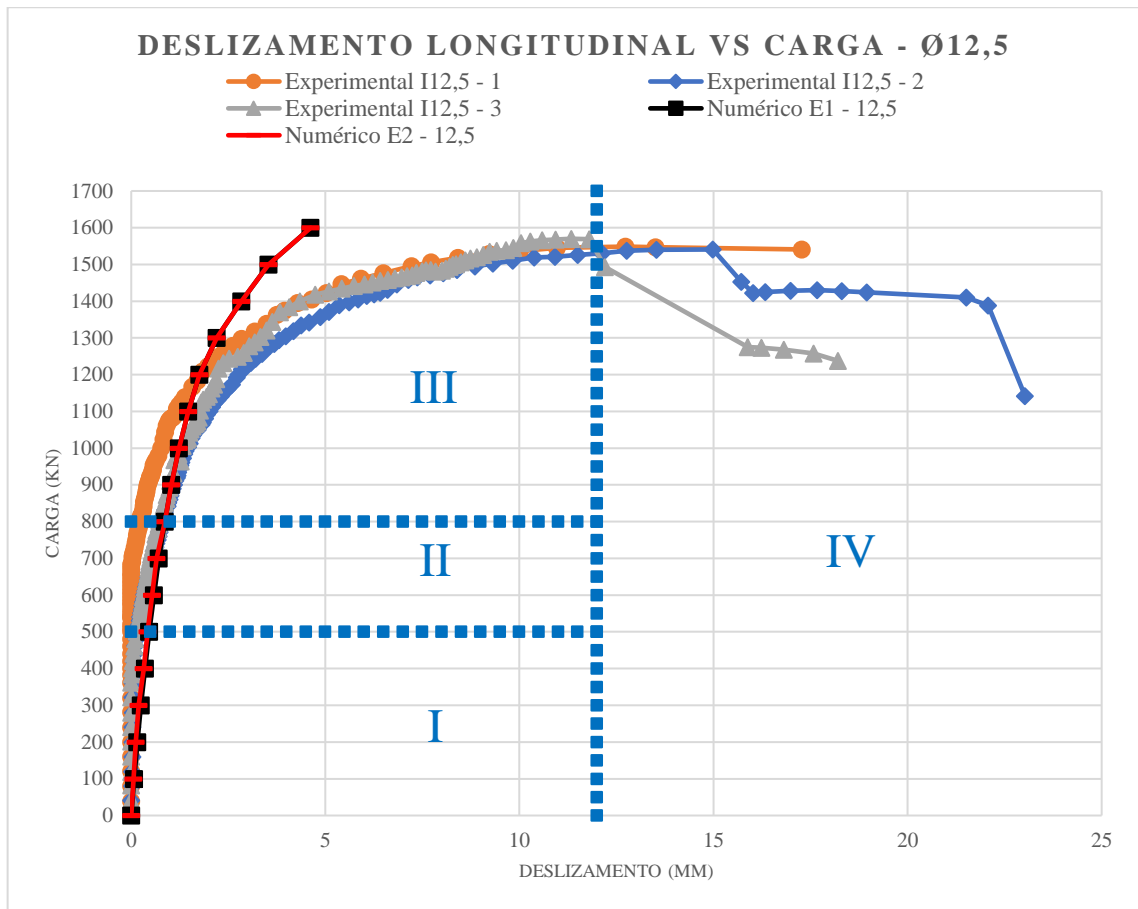
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 5 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 10,0 mm.



Fonte: Autor (2021).

Gráfico 6 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 12,5 mm.



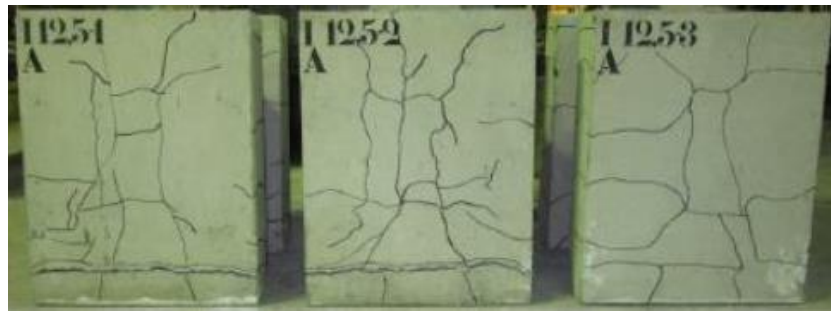
Fonte: Autor (2021).

Os gráficos 4, 5 e 6 foram analisados de maneira semelhante como a apresentada em Sousa (2019), dividindo-os em 4 fases.

A fase I vai até os carregamentos de 200 kN, 400 kN e 500 kN para os modelos de 8,0, 10,0 e 12,5 milímetros de diâmetro, respectivamente, e engloba a fase em que a estrutura se comporta de forma puramente elástica.

Na fase II verifica-se uma mudança do comportamento linear da fase I. Apresentando maiores deslocamentos, sugerindo um comportamento de maiores deformações dos materiais e de possível fissuração do concreto. A título de ilustração tem-se a Figura 32 com as fissurações ocorridas no concreto ao final do ensaio experimental. A fase II compreende-se entre os carregamentos de 200 kN e 400 kN para o conector de 8,0 milímetros de diâmetro, 400 kN a 700 kN para o de 10,0 milímetros e 500 kN a 800 kN para o de 12,5 milímetros.

Figura 32 - Mapa de fissuras das faces externas das lajes dos modelos I12,5.



(a) lado A



(b) lado B

Fonte: Barbosa (2016).

A partir da fase III tem-se o início da fase de comportamento plástico da estrutura, onde se apresentam deformações permanentes dos elementos e a tendência de se obter maiores deslizamentos longitudinais sem necessitar de um aumento significativo nos carregamentos.

Por fim tem-se a fase IV que representa a fase de ruptura dos modelos utilizados nos ensaios.

As tabelas 2, 3 e 4 apresentam os valores de deslizamento longitudinal obtidos tanto por Barbosa (2016) e por este trabalho para os modelos com conectores de 8,0, 10,0 e 12,5 milímetros de diâmetro.

Tabela 2 – Deslizamento longitudinal dos perfis metálicos por intensidade de carga para conectores com 8,0 mm.

Carga (kN)	Deslocamento(mm)/Série				
	Exp. I8,0-1	Exp. I8,0-2	Exp. I8,0-3	Num. E1-8,0	Num. E2-8,0
100	0,0845	0,0372	0,0248	0,1153	0,0793
200	0,1314	0,0699	0,0672	0,2600	0,2310
300	0,3745	0,3392	0,1829	0,4383	0,3783
400	0,7969	0,7777	0,5444	0,6857	0,6346
550	2,5153	2,2986	1,8327	1,4677	1,3766

Fonte: Adaptado Barbosa (2016) e Autor (2021).



Na Tabela 2 observa-se que até os 400 kN, fases I e II, o modelo Numérico E2-8,0 têm resultados que se aproximam bastante dos apresentados experimentalmente. Principalmente quando comparado com o modelo Experimental I8,0 – 1, com variação entre 0,05 e 0,1 milímetro de diferença em relação aos modelos experimentais. Já o modelo Numérico E1-8,0 nessa faixa de carregamento apresenta uma diferença de aproximadamente 0,1 milímetros dos resultados experimentais.

Para o carregamento de 550 kN, fase III, verifica-se um afastamento entre os resultados dos modelos experimentais e os modelos numéricos na ordem de 0,5 a 1 milímetro. Resultados esperados pela dificuldade de se conseguir simular de forma fiel a fase plástica de uma estrutura com elementos de diferentes materiais.

Tabela 3 - Deslizamento longitudinal dos perfis metálicos por intensidade de carga para conectores com 10,0 mm.

Carga (kN)	Deslocamento(mm)/Série				
	Exp. I10,0-1	Exp. I10,0-2	Exp. I10,0-3	Num. E1-10,0	Num. E2-10,0
200	0,0600	0,0517	0,0450	0,1940	0,1427
400	0,2938	0,28018	0,2400	0,4437	0,4007
600	0,7391	0,6873	0,6621	0,7557	0,7003
800	1,8864	1,4352	1,755	1,2953	1,2953

Fonte: Adaptado Barbosa (2016) e Autor (2021).

Analisando a Tabela 3 observa-se uma diferença máxima entre os resultados dos modelos experimentais e dos modelos Numérico E1-10 e Numérico E2-10 na ordem de 0,2 milímetro para o carregamento de 400 kN e para 200 kN e 600 kN uma diferença na ordem de 0,1 milímetro, nas fases I e II. Já para os carregamentos de 800 kN e 850 kN, fase III, tem-se uma diferença maior pelo mesmo motivo apresentado anteriormente.

Tabela 4 - Deslizamento longitudinal dos perfis metálicos por intensidade de carga para conectores com 12,5 mm.

Carga (kN)	Deslocamento(mm)/Série				
	Exp. I12,5-1	Exp. I12,5-2	Exp. I12,5-3	Num. E1-12,5	Num. E2-12,5
400	0,0	0,0599	0,0293	0,3530	0,3217
600	0,0	0,3405	0,3224	0,5827	0,5347
800	0,0	0,8011	0,7225	0,8633	0,6346
1000	0,7743	1,4482	1,3190	1,2287	1,2287
1200	1,7950	2,7625	2,2182	1,7607	1,7607
1400	4,4775	5,6987	4,3628	2,8407	2,8407
1500	7,4390	9,1683	8,3441	3,5410	3,5410

Fonte: Adaptado Barbosa (2016) e Autor (2021).

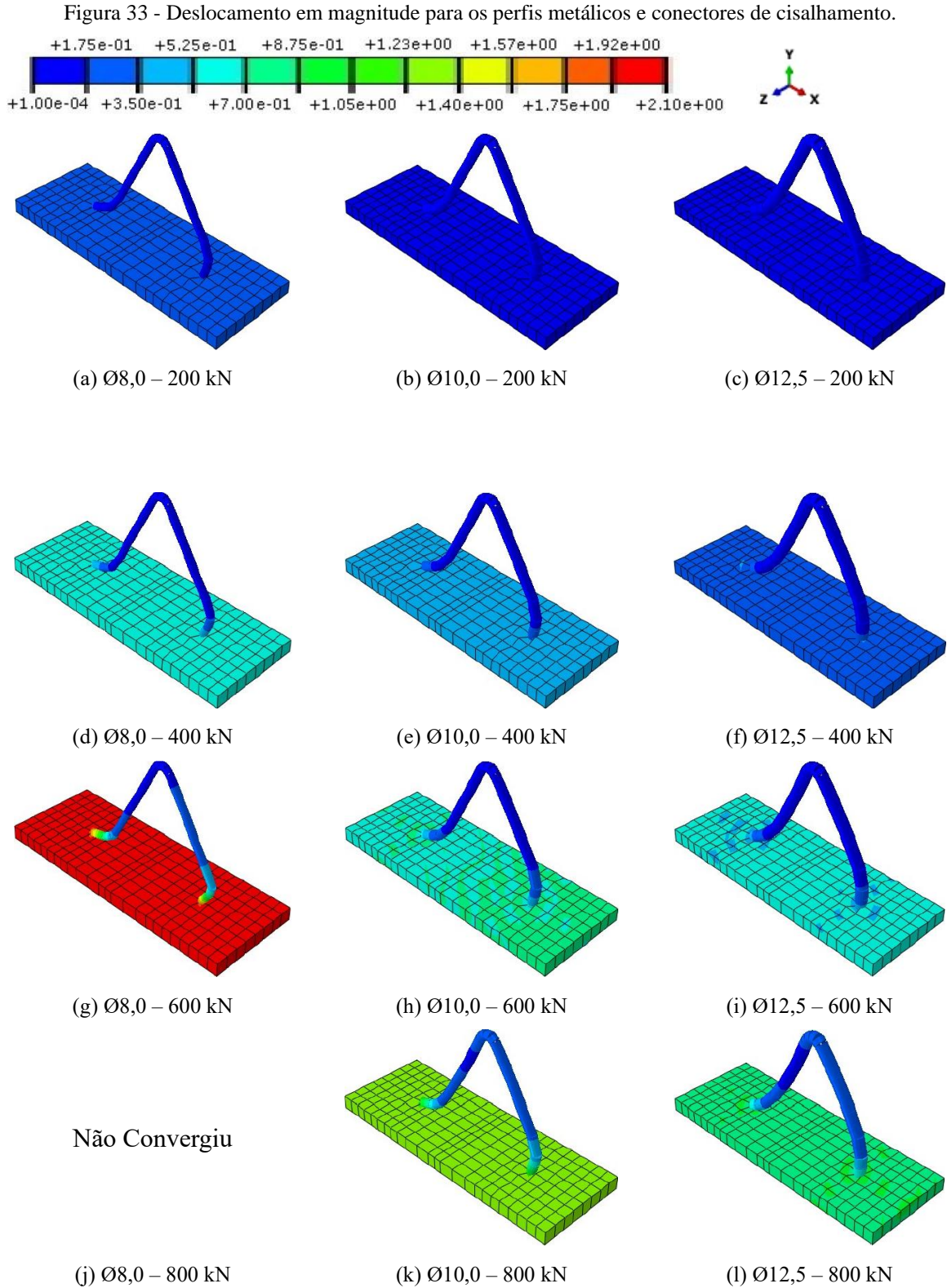
Para o caso apresentado na Tabela 4 observa-se uma maior proximidade entre os resultados dos modelos Numérico E1-12,5 e Numérico E2-12,5 e os dos modelos experimentais entre os carregamentos de 600 kN e 1200 kN, fase II e início da fase III, com diferenças entre 0,2 e 1 milímetro. Para os carregamentos de 200 kN e 400 kN, fase I, houve uma defasagem de dados nos modelos experimentais para comparação com os modelos numéricos. Principalmente com os dados do carregamento de 200 kN. Para o carregamento de 400 kN houve uma diferença de 0,3 milímetros entre os resultados experimentais e numéricos.

De modo geral, os resultados obtidos numericamente apresentam dados satisfatórios na simulação do comportamento das vigas mistas no ensaio *push-out* quanto ao deslizamento longitudinal. Principalmente nas fases I e II com comportamento puramente elástico e elastoplástico, mas também no início da fase III, fase plástica, apresentado tanto na proximidade entre resultados dos modelos experimentais e modelos numéricos, quanto na curvatura apresentada nos gráficos 4, 5 e 6 pelos resultados dos modelos numéricos.

Como previamente explanado no item 3.6, temos que inicialmente, fase I e fase II, o modelo E2 é mais rígido que o modelo E1 e, portanto, seus resultados são mais próximos dos resultados experimentais. Conforme seus acoplamentos tornam-se iguais temos que os dois modelos geram os mesmos resultados, fase III.

O modelo numérico E2 diferentemente do modelo numérico E1, não permite sua aplicação em outros contextos e situações que não sejam as apresentadas durante o ensaio de cisalhamento direto, *push-out*, pois a liberação das rotações em seus nós está intimamente ligada com os carregamentos aplicados durante o ensaio. De modo que numa situação de incêndio, por exemplo, não se tem esse indicador de carregamento, impossibilitando assim sua utilização como modelo de base para a criação de modelos numéricos de estudos futuros.

Por isso foi escolhido como modelo a ser utilizado neste trabalho o modelo numérico E1, e quando não dito o contrário as figuras e ilustrações se referem a este mesmo modelo.



Fonte: Autor (2021).

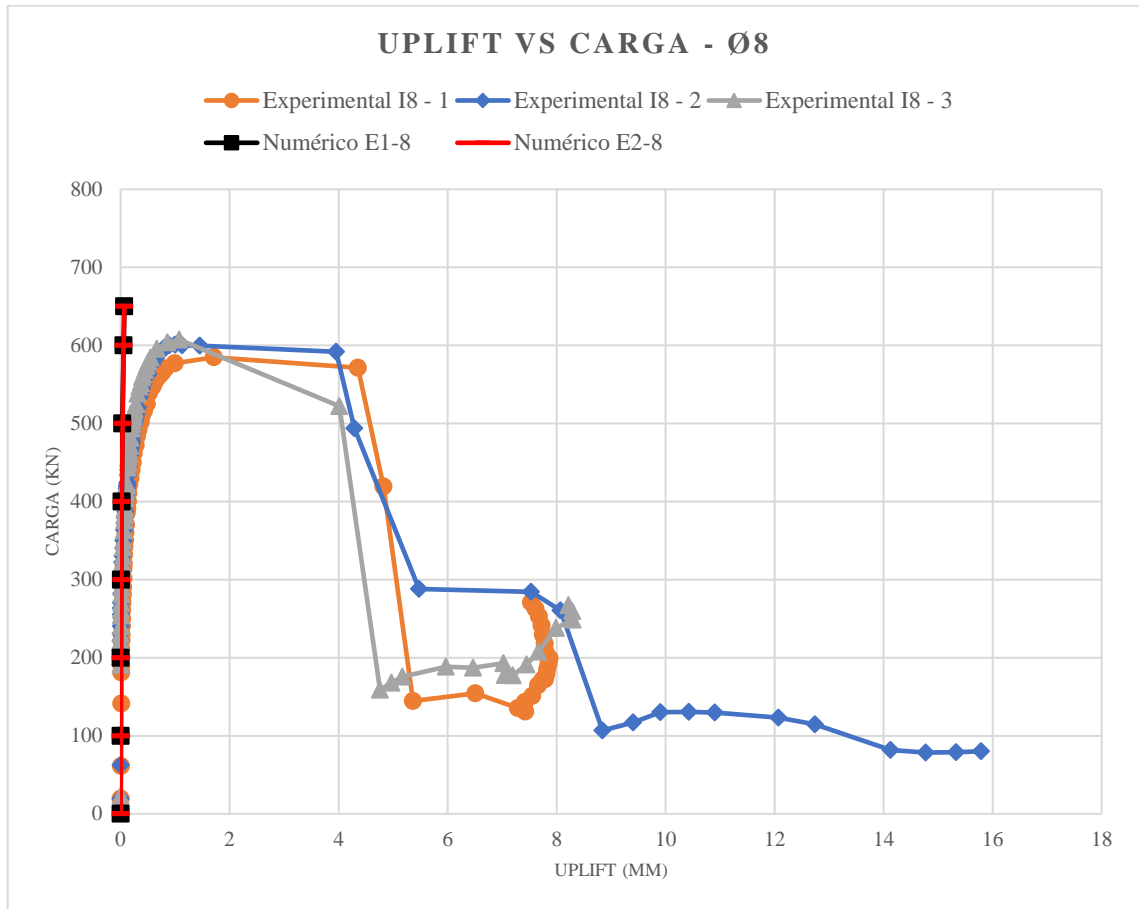
Pode-se observar na Figura 33, uma diferenciação entre as intensidades de deslocamentos para cada diâmetro de vergalhão utilizado na execução do conector.

Isso se deve justamente à diferença de tensões, onde, para um mesmo carregamento, quanto menor o diâmetro do conector, maiores são as tensões, devido à menor área de seção transversal. Gerando assim maiores deslocamentos longitudinais do perfil metálico, conforme verificado nas tabelas 2, 3 e 4.

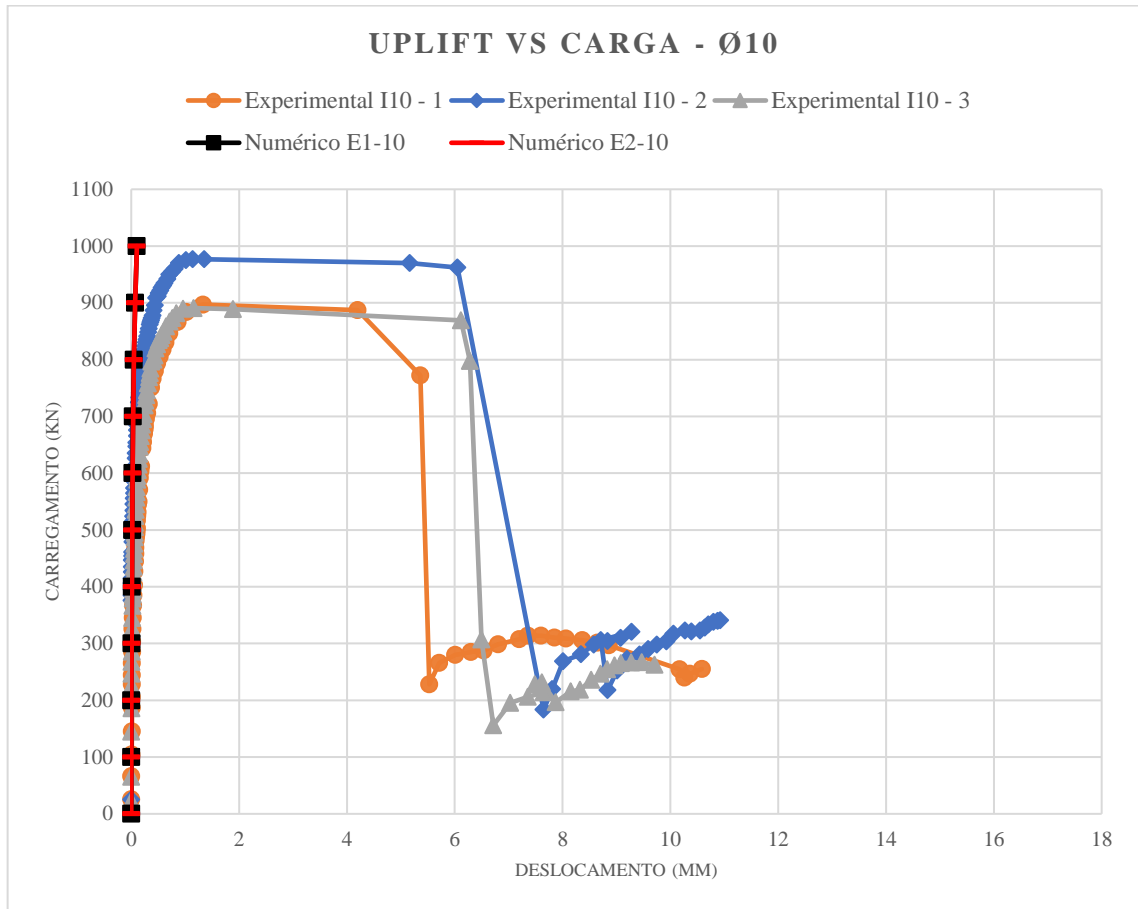
#### 4.2 “*Uplift*”

Conhecido como *uplift* o afastamento transversal entre a laje de concreto e o perfil metálico é gerado devido as forças de cisalhamento transversais aos conectores. A avaliação deste parâmetro é justificada pelo fato do Eurocódigo 4 utilizar valores máximos de *uplift* resistido pelos conectores para o dimensionamento dos mesmos.

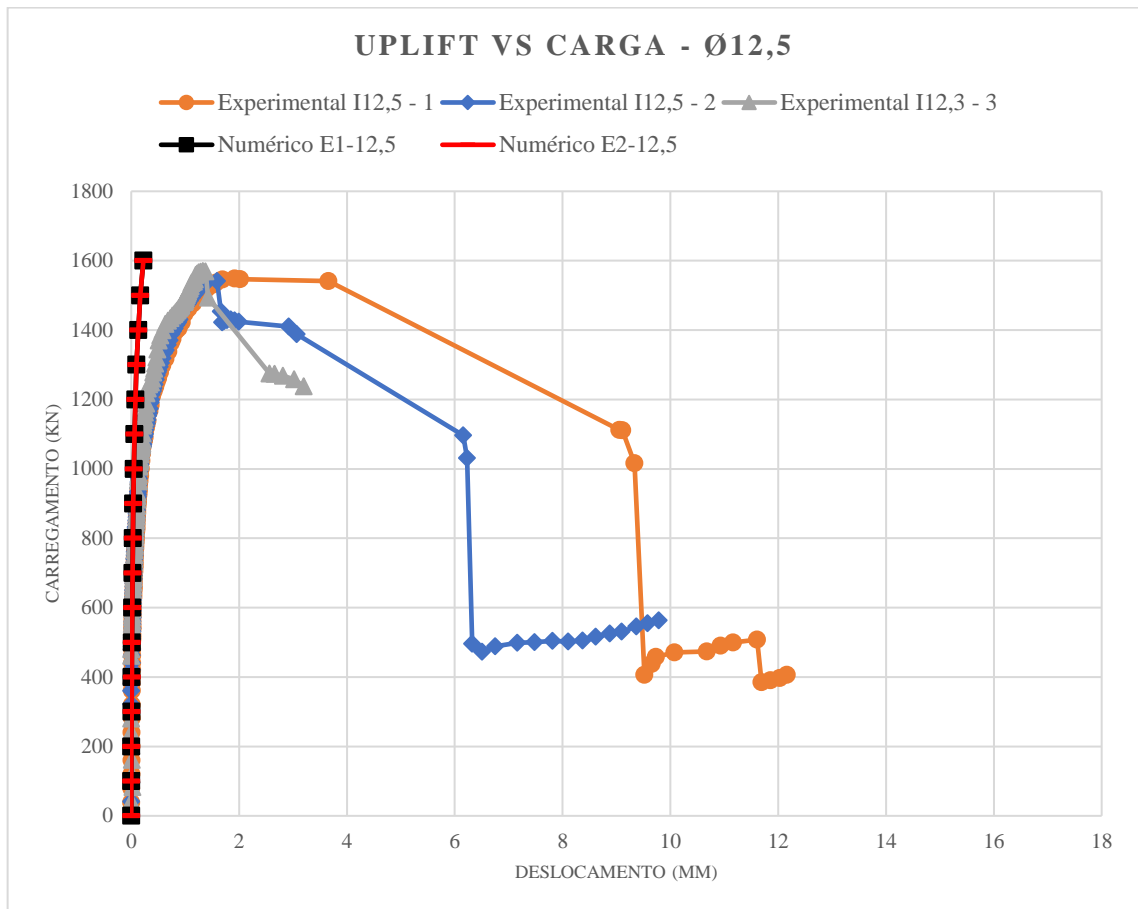
A nomenclatura dos modelos segue como determinada no item 4.1 com “I” para a série experimental encontrada por Barbosa (2016) e “E1” e “E2” para as séries numéricas de resultados. Os gráficos 7, 8 e 9 demonstram a evolução do deslocamento transversal, *uplift*, apresentado pela face da laje de concreto em função das cargas aplicadas na estrutura durante o ensaio.

Gráfico 7 - Gráfico de *uplift* por carga aplicada para o conector treçado isósceles de 8,0 mm.

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 8 - Gráfico de *uplift* por carga aplicada para o conector treçado isósceles de 10,0 mm.

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 9 - Gráfico de *uplift* por carga aplicada para o conector treliçado isósceles de 12,5 mm.

Fonte: Autor (2021).

Os gráficos 7, 8 e 9 demonstram concordância na fase elástica, entre os resultados de *uplift* encontrados nos modelos de simulação numérica e os encontrados durante os ensaios experimentais.

Na fase plástica os modelos numéricos se mantêm ainda bem rígidos se comparados com o experimental. Deve-se ressaltar que o modelo numérico simula apenas 1/8 do modelo real, portanto alguma condição de contorno utilizada para a simplificação do modelo pode ter gerado essa rigidez elevada.

Para as séries de 8 milímetros de diâmetro observa-se um comportamento similar entre os resultados até o carregamento de 400 kN com uma diferença de no máximo 0,1 milímetro como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - *Uplift* da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 8,0 mm.

Carga (kN)	Deslocamento(mm)/Série				
	Exp. I8,0-1	Exp. I8,0-2	Exp. I8,0-3	Num. E1-8,0	Num. E2-8,0
300	0,0535	0,0221	0,0261	0,0098	0,0140
400	0,1343	0,0960	0,0882	0,0178	0,0210
500	0,3641	0,2536	0,2193	0,0328	0,0358
550	0,6067	0,4223	0,3641	0,0430	0,0460

Fonte: Adaptado Barbosa (2016) e Autor (2021).

Para a série de 10 milímetros verifica-se proximidade de resultados até o carregamento de 700 kN com uma diferença entre 0,2 e 0,1 milímetro, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - *Uplift* da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 10,0 mm.

Carga (kN)	Deslocamento(mm)/Série				
	Exp. I10,0-1	Exp. I10,0-2	Exp. I10,0-3	Num. E1-10,0	Num. E2-10,0
400	0,0535	0	0,0370	0,0110	0,0150
500	0,1008	0,0307	0,0695	0,0162	0,0216
600	0,1646	0,0673	0,1202	0,0232	0,0276
700	0,2821	0,1279	0,2277	0,0334	0,0382
800	0,5068	0,2220	0,4165	0,0478	0,0478

Fonte: Adaptado Barbosa (2016) e Autor (2021).

Já nas séries de 12,5 este comportamento similar se mantém até o carregamento de 1000 kN com uma diferença de cerca de 0,1 milímetro, Tabela 7.

Tabela 7 - *Uplift* da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 12,5 mm.

Carga (kN)	Deslocamento(mm)/Série				
	Exp. I12,5-1	Exp. I12,5-2	Exp. I12,5-3	Num. E1-12,5	Num. E2-12,5
200	0,0065	0	0,0077	0,0024	0,0016
500	0,0214	0,0187	0	0,0114	0,0156
800	0,0874	0,0780	0,0769	0,0290	0,0290
1000	0,1813	0,1611	0,1528	0,0466	0,0466
1200	0,3798	0,3685	0,2823	0,0762	0,0762

Fonte: Adaptado Barbosa (2016) e Autor (2021).

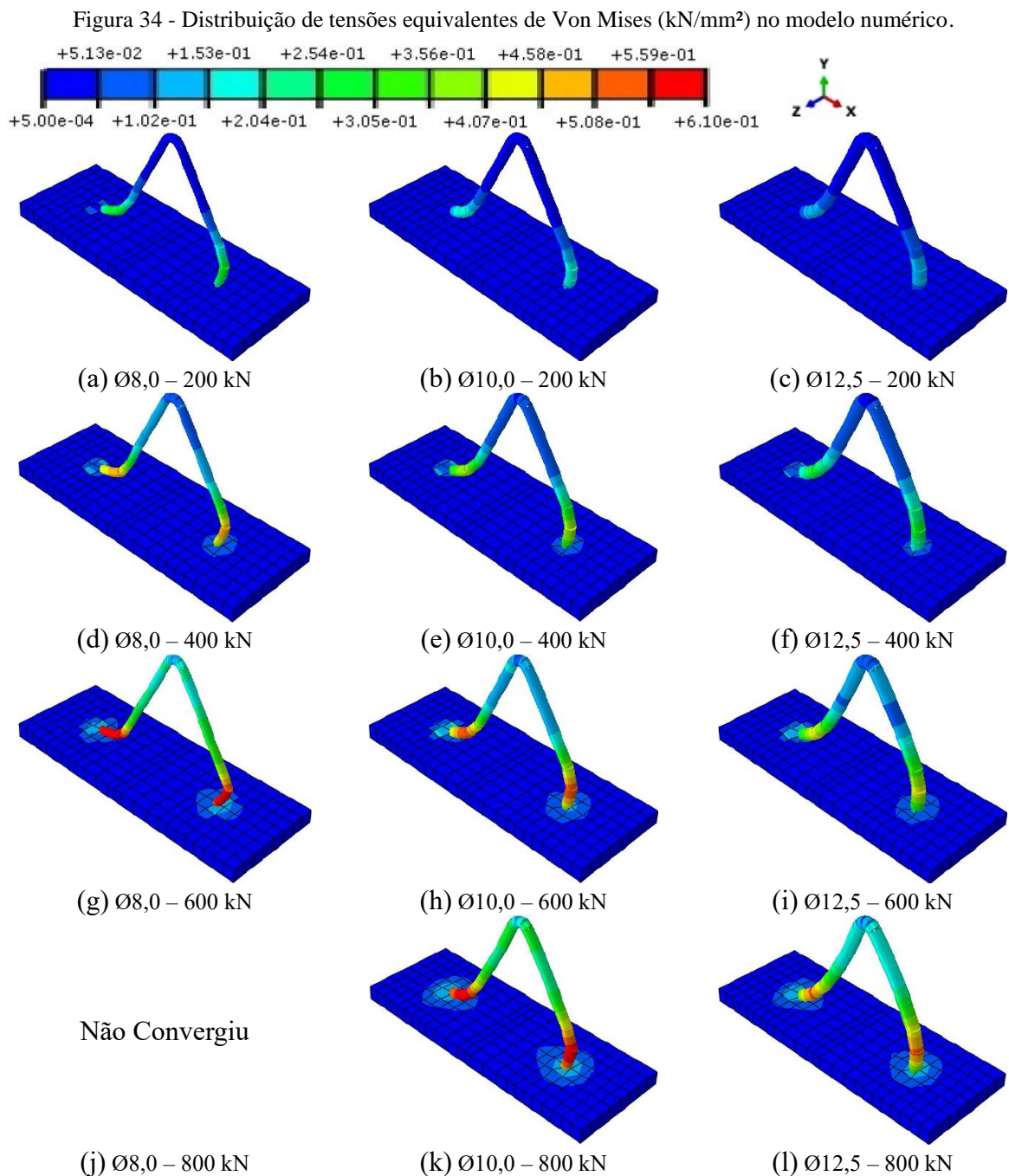
Após os análise dos resultados obtidos no modelo numérico se tem novamente a dificuldade de simular de forma acurada a fase puramente plástica da estrutura estudada, e que,



no geral, a série numérica E2 gerou resultados mais próximos ao experimental do que a série numérica E1.

### 4.3 Tensão de Von Mises

A verificação das tensões nos perfis metálicos e nos conectores de cisalhamento foi feita a partir do critério de tensões equivalentes de Von Mises. Foram analisadas 4 situações de carregamento diferentes, Figura 34, 200 kN, 400 kN, 600 kN e 800 kN.



Fonte: Autor (2021).

Observando-se a Figura 34, podemos perceber a semelhança entre a distribuição de tensão nos conectores, começando pelas bases, que os ligam ao perfil metálico, até os seus topos. Observa-se também que os conectores com maior diâmetro, ou seja, maior área de seção transversal, apresentam menor intensidade de tensão se comparados aos de menor diâmetro, para o mesmo carregamento.

Assim os conectores de menor diâmetro apresentam os maiores empenamentos e os maiores valores de deslizamentos longitudinais e deslocamento transversal, *uplift*, conforme verificado nos itens 4.1 e 4.2, respectivamente.

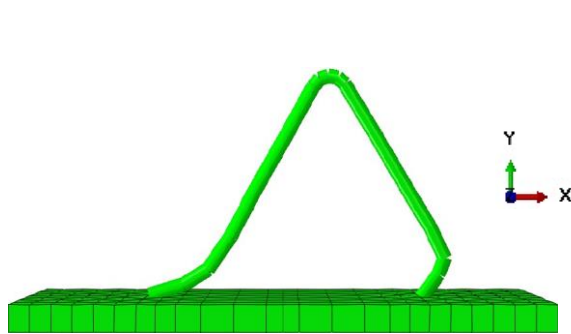
Percebe-se ainda a necessidade de estudo na solda que ligará os conectores com o perfil metálico, pois é justamente nessa região próxima ao plano de cisalhamento entre conector e perfil que se encontram os maiores valores de tensão.

#### 4.4 Conector de cisalhamento

##### 4.4.1 Deformada

A Figura 35 permite a comparação nas deformadas dos conectores no ensaio experimental feito por Barbosa (2016) e o modelo numérico estudado neste trabalho.

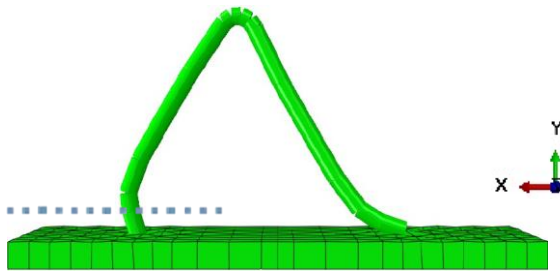
Figura 35 – Comparação das deformadas dos conectores de cisalhamento.



(a) Vista em plano XY do modelo numérico E1-8,0 com carregamento de 600 kN



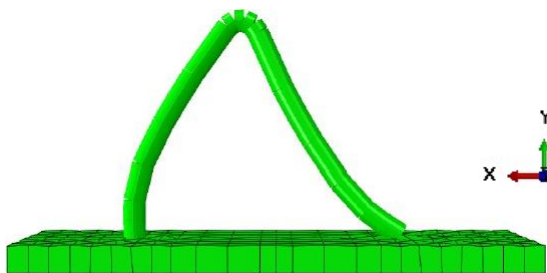
(b) Vista da laje A do modelo experimental I8,0-2



(c) Vista em plano XY do modelo numérico E1-10,0 com carregamento de 800 kN



(d) Corte longitudinal da laje do modelo experimental I10,0-1



(e) Vista em plano XY do modelo numérico E1-12,5 com carregamento de 800 kN



(f) Corte longitudinal da laje B do modelo experimental I12,5-1

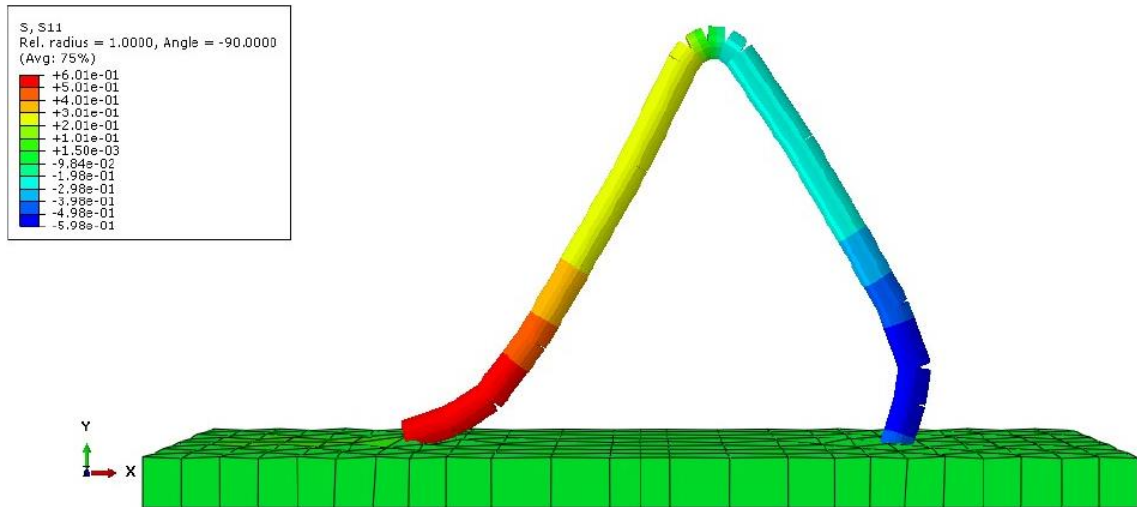
Fonte: Autor (2021) e Barbosa (2016).

A partir da Figura 35 vemos que há semelhança entre as deformadas apresentadas nos conectores testados numericamente e os estudados experimentalmente, com a diferença explicada pelo fato dos conectores experimentais ilustrados serem após a ruptura do modelo. Assim o mesmo absorveu mais cargas que os das imagens do modelo numérico. Entretanto mesmo com essa diferença, fica claro que eles seguem o mesmo padrão de deformada e assim pode-se atestar concordância entre o comportamento de ambos.

#### 4.4.2 Tensões na direção XX

A Figura 36 ilustra o comportamento na direção XX das tensões no conector de 10,0 milímetros para o carregamento de 800 kN, entretanto ele também retrata os demais conectores e carregamentos aplicados, mudando apenas as intensidades.

Figura 36 - Distribuição de tensões na direção XX (kN/mm<sup>2</sup>) no modelo numérico de E1-10,0 para carga de 800kN.



Fonte: Autor (2021).

Como pode ser visto na Figura 36, as regiões mais próximas da conexão entre perfil metálico e conector são aquelas com as tensões de maior intensidade. Sendo as regiões mais próximas do topo do conector aquelas com as tensões de menor intensidade.

Esses resultados reforçam a ideia da necessidade de estudos da solda nesta região da base do conector, pois como estes são os pontos de maior intensidade de concentração de tensões, também correspondem ao provável local de falha da interação entre a laje e o perfil. Falha que ao se consolidar a estrutura deixa de ser mista.

Observa-se também que, de acordo com a legenda, uma haste apresenta a mesma intensidade de tensão que outra apenas mudando o sentido. Sendo que a haste direita sofre compressão (em azul), enquanto a haste esquerda sofre tração (em vermelho). Comprovando assim a simetria esperada nas hastes do conector.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusão

Este trabalho teve como proposta desenvolver, por meio de uma análise em elementos finitos, um modelo numérico simplificado do ensaio *push-out* de vigas mistas de aço-concreto com conectores de cisalhamento treliçados, do tipo isósceles. Construídos a partir de vergalhões de aço CA-50 com 8,0, 10,0 e 12,5 milímetros de diâmetro. Com o intuito de permitir seu uso como calibração para modelos de estudos futuros.

Assim como em Sousa (2019), este trabalho constata a efetividade na utilização de elementos de vigas para a representação dos conectores de cisalhamento estudados, pois geram resultados satisfatórios em relação aos experimentais, principalmente no regime elástico, e tornam a modelagem mais simples, diminuindo o tempo de processamento. Quando comparados com elementos do tipo sólido que requerem um elevado refinamento da malha, e conseqüentemente, elevado esforço computacional.

Conclui-se que o modelo E1, elucidado no item 3.6, foi o que melhor atendeu aos objetivos deste estudo, pois este gerou resultados e simulou a estrutura mista estudada de forma satisfatória. Além de possibilitar sua utilização para calibração de outros modelos numéricos de estudos futuros.

O modelo E2 serviu para o melhor entendimento das condições de acoplamento dos conectores. De modo que, no geral, apresentou melhores resultados, na fase elástica, do que o modelo E1. Entretanto não permite sua utilização em estudos futuros devido à suas condições de acoplamento estarem intrinsecamente ligadas ao contexto de aplicação de carregamentos do ensaio de cisalhamento direto, *push-out*, de modo que tornaria sua utilização numa situação de incêndio, por exemplo, inviável.

No que se refere ao deslizamento longitudinal do perfil metálico, o conector com 8,0 milímetros de diâmetro apresenta resultados satisfatórios até o carregamento de 500 kN. O conector de 10,0 milímetros tem resultados satisfatórios até o carregamento de 800 kN. Já o conector de 12,5 milímetros até o carregamento de 1200 kN.

Conclui-se assim que, em relação ao deslizamento longitudinal, o modelo numérico simula de forma satisfatória o modelo experimental na fase elástica e aproximadamente até metade da fase plástica. Com resultados com proximidade na ordem de décimos e centésimos de milímetros.

No que diz respeito ao afastamento transversal, *uplift*, entre perfil metálico e laje de concreto, o modelo numérico apresentou-se bem mais rígido que o modelo experimental, de modo que resultados da fase puramente elástica apresentam-se satisfatórios, na ordem dos centésimos de milímetros. Porém conforme entra-se na fase plástica, temos um afastamento entre os resultados numéricos e experimentais.

Essa diferença no *uplift* pode ser explicada por algumas restrições aplicadas na laje de concreto, causadas pelas condições de contorno usadas para a criação do modelo simplificado.

Com a análise feita a partir da distribuição de tensões pelo critério de Von Mises, concluiu-se que o modelo numérico criado tem comportamento semelhante ao experimental. Com os conectores de cisalhamento de menor diâmetro apresentando maiores concentrações de tensões, para um mesmo carregamento, quando comparados aos de maior diâmetro. Isso se deve as suas menores áreas de seção transversal.

Esta análise pelo critério de Von Mises também permite observar semelhança de comportamento entre o modelo numérico e experimental em acumular tensões nas partes mais inferiores do conector. Confirmado pelo fato de, no modelo experimental, a ruptura dos conectores se darem justamente nessas regiões.

A visualização da intensidade de concentração dessas tensões, observadas no modelo numérico, permite ainda explicar o porquê de os maiores empenamentos, deslizamentos longitudinais e *uplift* se apresentarem nos conectores de menor diâmetro, pois estes apresentam as maiores intensidades de concentração de tensões. Resultados esperados devido a suas menores seções transversais.

Conclui-se com a análise da deformada dos conectores e das tensões no sentido XX que a modelagem numérica segue o padrão de deformada apresentado pelo conector no modelo experimental. Apresentando maiores deformações próximo a sua base. O modelo numérico atende ainda a simetria esperada na distribuição tensões. Mudando apenas o sentido de uma haste do conector em relação à outra.

Com todos os aspectos apresentados acima, o modelo numérico criado simula de forma satisfatória o modelo experimental, principalmente em relação a deformada e distribuição de tensões no conector de cisalhamento. Mostrou-se também necessitar de pouco esforço computacional, já que cada análise de carregamento durou cerca de 20 ou 30 segundos no máximo.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O escopo presente neste trabalho tratou apenas de criar um modelo numérico simplificado de conectores de cisalhamento treliçados, do tipo isósceles, que representasse de forma satisfatória o comportamento apresentado por Barbosa (2016) e permitisse estudos futuros utilizando como base o modelo aqui criado. Desse modo seguem tópicos de relevância como sugestão para trabalhos futuros.

- Estudar e aferir melhor a rigidez elevada apresentada pelo modelo numérico, na fase plástica, no *uplift*;
- Aplicação da estratégia de modelagem desenvolvida neste trabalho para vigas mistas contínuas para uso cotidiano;
- Aplicação da metodologia estudada em situações excepcionais como de carregamentos cíclicos, incêndio, abalos sísmicos, entre outras.

## REFERÊNCIAS

ALVA, G. M. S. **Sobre o projeto de edifícios em estruturas mista aço-concreto**. São Carlos, 2000. 277p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18082006-143950/pt-br.php>. Acesso em: 20 fev. 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 237 p., 2008.

BARBOSA, W. C. S. **Estudo de conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas mistas de aço-concreto**. Brasília, 2016, 511p. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

Disponível em:

<https://repositorio.unb.br/handle/10482/23188>. Acesso em: 20 abr. 2020.

CAVALCANTE, O.R.O. **Estudo de Conectores de Cisalhamento do Tipo ‘V’ em Vigas Mistas**. Brasília, 2010, 192p. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

Disponível em:

<https://repositorio.unb.br/handle/10482/7890>. Acesso em: 20 abr. 2020

CHAPMAN, J.C.; BALAKRISHNAN, S. **Experiments on composite beams**. The Structural Engineer, v.42, n.11, p. 369-383, 1964.

CHATER, Latif. **Estudo numérico e experimental de conectores de cisalhamento feitos de vergalhão CA-50 para uso em estrutura mista aço-concreto**. 2015. 177 f., il. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)-Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

Disponível em:

<https://repositorio.unb.br/handle/10482/19001>. Acesso em: 20 fev. 2021

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **1992-1-1: Eurocode 2 -Design of concrete structures**; Part 1: General rules and rules for buildings, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **1994-1-1: Eurocode 4 -Design of composite steel and concrete structures**; Part 1.1: General rules and rules for buildings, 2011.

GRIFFIS, L.G. The 1994 T.R. High Lecture: Composite Frame Construction. In: **National Steel Construction Conference**, Pittsburgh, Pennsylvania, 18 – 20 maio, 1994. Proceedings. New York, AISC. v.1, p.1.1-1.72, 1994.



KIRCHHOF, L.D. **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio.** São Carlos, 143p, 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

Disponível em:

<http://sistemas.set.eesc.usp.br/producao/35>. Acesso em: 25 nov. 2020.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga.** São Carlos, 144p, 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2006.

Disponível em:

[https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-22062006110301/publico/2006ME\\_TatiannelKotinda.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-22062006110301/publico/2006ME_TatiannelKotinda.pdf). Acesso em: 20 abr. 2021.

MAHDI S.; SHARIATI, A.; RAMLISULONG, N. H.; MELDISUHATRIL; **Various types of shear connectors in composite structures: A review.** Department of Civil Engineering, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia, 2012.

Disponível em:

<https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-full-text-pdf/FDA098C17664>. Acesso em: 02 fev. 2021.

OEHLERS, D. J.; NGUYEN, N. T.; AHMED, M.; BRADFORD, M. A. (1997) **Partial interaction in composite steel and concrete beams with full shear connection.** Journal of Constructional Steel Research. N. 2/3, vol.41.

QUEIROZ, Gilson; PIMENTA, Roberval José; MARTINS, Alexander Galvão. **Estruturas mistas.** Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2010. 2v. (Série Manual de Construção em Aço). ISBN 9788589819213 (v.1); 9788589819220 (v.2).

SARTURI, Francis Diego Moretto. **Simulação computacional de estruturas de concreto reforçadas com aço e compósitos de fibra de carbono.** 2014.

SIMULIA. **Abaqus Theory Manual.** Abaqus Documentation. (2009).

Disponível em:

<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch18s01abo17.html#usb-mat-cplastic>. Acesso em: 7 fev. 2021.

SLUTTER, R.G.; DRISCOLL, G.C. **Flexural strength of steel-concrete composite beams.** Journal of the Structural Division – ASCE, Proc., v.91, n.ST2, p.71-99, 1965.

SOUSA, Joseanne Alves de. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto utilizando conectores de cisalhamento treliçados.** 2019. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2019.

Disponível em:

<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/49554>. Acesso em: 20 abr. 2020.

VERÍSSIMO, G. S. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento.** Belo Horizonte, 2007, 290p. Tese de Doutorado em Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade de Federal de Minas Gerais, 2007.

Disponível em:

<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/LMCA-7E6HVC/1/11.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2020.

VIEST, I. M. **Review of research on composite steel-concrete beams: Journal of the Structural Division** – ASCE, Proc., v. 86, st6, p 1-21, 1960.