



UFC

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

GUSTAVO HENRIQUE SILVA RODRIGUES

**ESTUDO DA CAPACIDADE RESISTENTE DO CONECTOR DE
CISALHAMENTO TRELIÇADO RETO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS
FINITOS**

RUSSAS

2022

GUSTAVO HENRIQUE SILVA RODRIGUES

ESTUDO DA CAPACIDADE RESISTENTE DO CONECTOR DE
CISALHAMENTO TRELIÇADO RETO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS
FINITOS

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: Jerfson Moura Lima

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R613e Rodrigues, Gustavo Henrique Silva.

Estudo da capacidade resistente do conector de cisalhamento treliçado reto via método dos elementos finitos / Gustavo Henrique Silva Rodrigues. – 2022.

78 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Jerfson Moura Lima.

1. Conector treliçado reto. 2. Ensaio Push-out. 3. Modelagem numérica tridimensional. 4. Viga mista. I. Título.

CDD 620

GUSTAVO HENRIQUE SILVA RODRIGUES

ESTUDO DA CAPACIDADE RESISTENTE DO CONECTOR DE
CISALHAMENTO TRELIÇADO RETO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS
FINITOS

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.

Aprovado em: __/__/____

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Paulo Henrique Roberto Moura
Universidade Federal do Ceará (UFC)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por toda a proteção, inspiração, força de vontade e paciência que me fizeram superar as dificuldades.

Aos meu pais, Sebastiana Dalva da Silva e Warner Jorge Rodrigues, pelo amor, carinho, dedicação e educação na minha criação.

Aos meus familiares, em especial a minha tia, Maria Dalvaneide da Silva que me criou como seu filho, aos meus tios José Roseno da Silva Filho, José Romulo da Silva e José Francineudo da Silva que me serviram de exemplo para a retidão.

Aos meus amigos Joana Nara, Maria Karina, Jaiza Lima e Guilherme Moreira, por todo o apoio, companheirismo e troca de conhecimento durante todo o curso, e que nos momentos de maior dificuldade se fizeram presente em minha vida.

À Bianca Moreira, pelo companheirismo, paciência e carinho nessa trajetória.

Ao meu professor e orientador Jerfson Moura Lima, por compartilhar de seu conhecimento e experiência, paciência e dedicação durante o desenvolvimento desse trabalho.

A todos os meus professores do ensino médio que me ensinaram a aprender e moldaram meu conhecimento básico.

A todos os meus professores de graduação por todo o conhecimento técnico e ética profissional transmitida em toda a minha formação.

RESUMO

A estrutura mista é um tipo de método construtivo que visa extrair o máximo das propriedades dos materiais que a compõe. Para que isso seja alcançado é fundamental garantir a união dos materiais que a constituem. Em vigas mistas de aço e concreto é imprescindível que se exista um conector de cisalhamento para garantir a integridade da ligação entre esses dois elementos, possibilitando que a laje de concreto e o perfil de aço possam trabalhar solidariamente. Para a concepção de novos conectores e análise dos já existentes, o ensaio *Push-out* é a principal forma de estudar e avaliar um conector. Entretanto, esses ensaios são custosos, demorados e dependem da disponibilidade de maquinário apropriado. Em contra partida, o estudo dos conectores de cisalhamento por meio do método de elementos finitos proporciona resultados de forma completa, por um baixo custo operacional e de forma ágil quando bem calibrado. A fim de estudar um conector de cisalhamento alternativo, esse trabalho fez uso do *software* ABAQUS, para que, por meio do método dos elementos finitos estude a influência da variação de altura na capacidade resistente do conector treliçado reto. Inicialmente foi concebido um modelo tridimensional do ensaio *push-out* com o intuito de validar a modelagem por meio de ensaios experimentais para o mesmo conector. Após a validação, o conector treliçado reto teve sua altura alterada para 90, 110 e 150mm com o propósito de comparar as capacidades resistentes, analisar a distribuição de tensão e o modo de ruptura dos conectores.

Palavras-chave: Conector treliçado reto. Ensaio *Push-out*. Modelagem numérica tridimensional. Viga mista.

ABSTRACT

The composite structure is a type of constructive method that aims to extract the maximum of the properties of the materials that compose it. For this to be achieved, it is indispensable to ensure the union of the materials that constitute it. In composite steel and concrete beams, it is essential that there is a shear connector to guarantee the integrity of the connection between these two elements, allowing the concrete slab and the steel profile to work together. For designing new connectors and analyzing existing ones, the Push-out test is the main way to study and evaluate a connector. However, these tests are costly, time-consuming and depend on the availability of appropriate machinery. On the other hand, the study of shear connectors through the finite element method provides results in a complete way, at a low operational cost and in an agile way. In order to study an alternative shear connector, this work made use of the ABAQUS software, so that, through the finite element method, the influence of height variation on the resistance capacity of the straight truss connector could be studied. Initially, a three-dimensional model of the push-out test was conceived in order to validate the modeling through experimental tests for the same connector. After validation, the straight lattice connector had its height changed to 90, 110 and 150 mm where it was possible to compare the resistant capacities, analyze the stress distribution in these connectors and the mode of rupture of the connectors.

Keywords: Straight lattice connector. Push-out test. Three-dimensional numerical modeling. Composite beam.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	JUSTIFICATIVA.....	12
3	OBJETIVOS	14
3.1	Objetivo geral.....	14
3.2	Objetivos específicos.....	14
4	METODOLOGIA.....	14
5	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
5.1	Estrutura mista	15
5.2	Viga mista.....	18
5.3	Interação entre a superfície laje - perfil	20
5.4	Ensaio <i>Push-out</i>	21
5.4.1	<i>Ensaio push-out desenvolvido por Barbosa (2016)</i>	22
5.5	Ductilidade e rigidez dos conectores de cisalhamento	24
5.6	Tipos de conectores.....	25
5.6.1	<i>Conector “U”</i>	25
5.6.2	<i>Stud bolt</i>	27
5.6.3	<i>Conectores alternativos</i>	28
5.6.3.1	<i>Perfobond e Crestbond</i>	29
5.6.3.2	<i>Conector V</i>	30
5.6.3.3	<i>Conector de cisalhamento Trelizado</i>	31
5.7	Modelagem Numérica.....	34
6	METODOLOGIA PARA A ELABORAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	37
6.1	Partes constituintes	37
6.2	Definição dos materiais	39
6.2.1	<i>Aço do perfil metálico</i>	39
6.2.2	<i>Aço dos conectores de cisalhamento</i>	39

6.2.3 Concreto para a laje	41
6.2.3.1 <i>Parâmetros plásticos</i>	41
6.2.3.2 <i>Comportamento uniaxial do concreto à compressão</i>	42
6.2.3.3 <i>Comportamento uniaxial do concreto à Tração</i>	44
6.3 Montagem do modelo	48
6.4 Análise numérica	49
6.5 Interação entre as partes	49
6.5.1 <i>Interação laje - mesa do perfil</i>	49
6.5.2 <i>Interação laje - conectores de cisalhamento</i>	50
6.5.3 <i>Interação laje - armadura da laje</i>	51
6.5.4 <i>Interação conector de cisalhamento - mesa do perfil</i>	52
6.6 Condições de contorno	52
6.7 Carregamento	54
6.8 Definição da malha das partes	55
7 VALIDAÇÃO DO MODELO	56
7.1 Curva carga x deslizamento	56
7.2 Capacidade resistente	57
7.3 Modo de ruptura	58
7.4 Comparação do modelo com outras literaturas	61
8 ESTUDO PARAMÉTRICO	63
8.1 Comparação entre o conector treliçado retangular e isósceles	69
9 CONCLUSÃO	71
9.1 Conclusão sobre a modelagem do conector	71
9.2 Conclusão sobre a análise paramétrica	72
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e o passar dos anos, novos sistemas estruturais surgem e os mais antigos são atualizados, possibilitando construir estruturas cada vez mais seguras e econômicas. As estruturas mistas, em especial aquelas que fazem uso do aço e concreto, é uma das que vem se atualizando e extraindo o máximo dos avanços tecnológicos com o passar dos anos. Esse tipo de sistema estrutural visa extrair o máximo de cada material constituinte, em vigas mistas de aço e concreto, por exemplo, o concreto apresenta-se em regiões sob regime de compressão, enquanto o aço sob tração. Essas estruturas podem apresentar também um rápido processo construtivo, já que se faz uso de um menor uso de formas de madeira e escoras (BEZERRA *et al.*, 2018).

Para que, as estruturas constituídas de elementos mistos sejam capazes de exercer sua serventia, é imprescindível que seja garantida a ligação entre os seus elementos, de forma que possam atuar como um elemento único, caso não seja garantida a integridade da ligação desses elementos, eles trabalham individualmente. A ligação entre o aço e o concreto pode ser garantida de três formas: por atrito, aderência ou por peças mecânicas, esta última forma apresentada é a mais representativas delas, já que as outras duas formas apresentam imprevisibilidade na sua carga admitida.

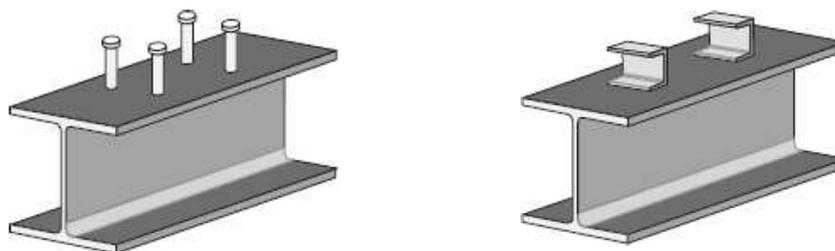
Segundo Lima (2018) os conectores de cisalhamento aplicados em vigas mistas aço-concreto podem ser descritos como peças que ficam fixadas na face do perfil metálico e embutidas no concreto, trabalham de forma a resistir esforços cisalhantes longitudinais na superfície entre os materiais. Além de evitar o deslizamento horizontal na superfície de interação dos materiais, também previne a separação dessas superfícies conhecido também como *uplift*.

A versão de 2008 da ABNT NBR 8800 estabelece parâmetros de dimensionamento para dois tipos de conectores, o conector de pino de cabeça ou *stud bolt* e o conector de perfil em “U” (Figura 1).

Com a finalidade de se criar alternativas mais econômicas e de mais fácil instalação aos conectores normatizado, novos tipos foram propostos, como o conector de chapa dentado de Verissimo (2007), conector do tipo “V” idealizado

por Cavalcante (2010) e o conector treliçado proposto por Barbosa (2016). Todos esses conectores alternativos citados tiveram que passar por um processo experimental de ensaios *push-out* afim de que se fosse obtido resultados acurados.

Figura 1 - Conectores descritos na ABNT NBR 8800



(a) Conector *Stud bolt*

(b) Conector Perfil em 'U'

Fonte: Veríssimo (2007).

Afim de suprir as dificuldades de uma bateria de ensaios experimentais, a elaboração de uma modelagem numérica é apresentada como uma alternativa mais rápida e barata para o estudo do comportamento desses conectores, assim como fizeram em suas pesquisas Tristão (2002), Fortes (2018), Sousa (2019), Carneiro (2021) e Moura (2022).

2 JUSTIFICATIVA

Com o advento da ABNT NBR 8800:2008 as estruturas mistas e os conectores de cisalhamento puderam ser mais difundidos no meio da construção civil no Brasil. O conector estilo *stud bolt*, apresentado nesta norma, é o mais usado na construção civil no mundo (XUE *at al.*, 2012). A ampla utilização desse conector está ligada à sua versatilidade na aplicação e a velocidade de sua instalação. Entretanto, a necessidade de uma fonte energética de alta potência para a fixação dos conectores no perfil metálico inviabiliza a possibilidade da implementação desse conector.

O conector em perfil "U" laminado que também tem descrito na ABNT NBR 8800:2008 seu dimensionamento, é outra forma de garantir a ligação do concreto e do aço em vigas mista. Este conector de cisalhamento apresenta uma

melhor distribuição de tensões devido a sua maior área de contato com a laje de concreto além de ter uma fácil fabricação, visto que ele pode ser constituído a partir de um perfil metálico. Contudo, sua instalação tem uma baixa produtividade e sua aplicação é recomendada para sistemas com lajes maciças (VERISSIMO,2007).

Barbosa (2016) idealizou o conector treliçado com a finalidade de proporcionar uma redução dos custos dos materiais e dos equipamentos para a instalações dos conectores. O conector é construído a partir de vergalhões de aço CA-50 dobrado de forma triangular e instalado por meio de solda comum. Desta forma, o conector treliçado surgiu como alternativa viável, econômica e eficiente aos demais conectores para estruturas mistas (BARBOSA, 2016).

Em sua pesquisa o autor elaborou ensaios experimentais de modo a estudar e avaliar o conector treliçado (Figura 2). Para isso, concebeu um programa experimental para o estudo de dois tipos de conector treliçado, um com uma forma de triangulo isósceles e outro um triangulo de ângulo reto. Foram feitos 9 ensaios com cada conector, onde foi estudado a influência do diâmetro do vergalhão de aço de cada conector e a resistência do concreto da laje. O ensaio elaborado por foi o *push-out* e foram avaliados o deslizamento horizontal, *uplift* e a capacidade resistente dos ensaios.

Figura 2 – Ensaio experimental de Barbosa (2016)



(a) Conector com a aplicação dos sensores



(b) Concretagem dos ensaios *push-out*

Fonte: Barbosa (2016)

Por se tratar de um conector de baixo custo, de fácil fabricação e de rápida instalação, acredita-se que é fundamental que o conector treliçado seja estudado afim de que tenha a sua utilização amplamente difundida.

Com a finalidade de que o conector treliçado reto de Barbosa (2016) tenha seu comportamento mais esclarecido e fundamentado, essa pesquisa propõe analisar a influência de alterações da geometria do conector, em sua capacidade resistente, comportamento e modo de falha. Buscando a possibilidade de que conectores de alturas menores possam ser aplicados em estruturas compatíveis, de forma que os conectores deixem de ser uma restrição na hora de dimensionar uma laje em estruturas mista. Para que isso seja alcançado, uma modelagem numérica tridimensional não linear por meio dos elementos finitos foi idealizada, tendo em vista a economia monetária e de tempo que esses modelos podem proporcionar.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a influência da variação da altura do conector treliçado reto na sua relação em sua capacidade resistente.

3.2 Objetivos específicos

Esse trabalho tem como objetivos específicos:

- Validar o modelo numérico desenvolvido com os resultados experimentais de Barbosa (2016).
- Realizar um estudo da variação dos parâmetros geométricos a partir do modelo numérico validado, consistindo da variação da altura do conector treliçado reto.
- Analisar a distribuição de tensões nos conectores.
- Avaliar os modelos de ruptura dos conectores treliçados reto com distintas alturas.

4 METODOLOGIA

Foi desenvolvido por meio do *software* ABAQUS um modelo numérico tridimensional não linear em elementos finitos do ensaio *push-out* normalizando pela EN 1994-1:2004. O modelo foi validado com os resultados dos ensaios experimentais de Barbosa (2016).

Com o modelo validado, foi realizado um estudo a cerca da variação de parâmetros geométricos com o intuito de avaliar o comportamento e a capacidade resistente do conector com a variação de sua altura. Foram modelados de forma numérica ensaios *push-out* para 4 alturas de conectores: 90,110,130 e 150 mm.

Traçou-se um gráfico de Carga x Deslocamento longitudinal dos ensaios *Push-out* para a análise do comportamento do conector, além de ser avaliado a distribuição de tensões nos conectores e na laje, também foi avaliado o modo de ruptura dos modelos. O modelo também foi comparado com a modelagem numérica de Lima *et al.* (2022).

5 REVISÃO DA LITERATURA

Esse capítulo tem o objetivo de elucidar os conceitos que foram utilizados para a elaboração deste trabalho. Trata de conhecimento gerais sobre estrutura mista e viga mista, aborda sobre a superfície de contato aço-concreto e os seus tipos de interações, descreve o ensaio *push-out*, enumera os conectores de cisalhamento normalizados e alternativos, por fim aborda sobre a modelagem numérica e as suas vantagens.

5.1 Estrutura mista

As estruturas mistas são compostas por elementos estruturais onde em sua seção existem dois ou mais materiais que trabalham de forma integral, que juntos têm comportamento diferente dos materiais que originalmente compõe o elemento (BARBOSA, 2016).

Os seus tipos mais comuns são aqueles que fazem uso do aço e do concreto trabalhando de forma solidária, onde para se garantir essa ligação entre os elementos, são necessários artifícios para que seja possível a transmissão de esforços entre as peças. A interação, por exemplo, entre um perfil de aço e uma peça de concreto acontece mediante a elementos mecânicos (conectores,

saliência, ressaltos, etc.), por atrito e por aderência e repartição de cargas. (LIMA, 2018)

O objetivo das estruturas mistas é que seja possível extrair o máximo dos elementos que a constituem, no caso do aço e do concreto, espera-se que o concreto resista aos esforços de compressão e que o aço supra a insuficiência do concreto à tração e resista a esses esforços.

Os elementos estruturais mistos oferecem uma série de vantagens sobre os não-mistos. A seção de aço, por exemplo, pode ser reduzida em relação a uma peça equivalente apenas de aço, já que o concreto resiste a uma parcela do carregamento atuante. Além disso, um elemento misto é, em geral, mais rígido do que um não-misto de mesma dimensão, em consequência disso, sofre menos deformação e vibração. (VERÍSSIMO, 2007).

Além dessas vantagens, segundo Barbosa (2016) quando comparamos com estruturas de concreto armado moldadas in loco, podemos citar a possibilidade de dispensar as fôrmas e o escoramento, agilidade na execução da obra, redução do peso próprio da estrutura e conseqüentemente da carga transmitida à fundação e aumento da precisão dimensional da construção.

Já quando comparamos as estruturas mistas com estruturas puramente metálicas o autor cita a redução considerável de aço considerado estrutural, aumento da rigidez da estrutura e redução das medidas tomadas contra incêndio e corrosão.

Segundo Malite (1990) os estudos sobre sistemas mistos de aço e concreto tiveram seu início em 1914 na Inglaterra, quando a empresa *Redpath Brow and Company* iniciou uma série de ensaios a respeito de sistemas compostos para pisos. No Canadá, em 1922 mais ensaios foram feitos sobre a supervisão da *Dominium Bridge Company*. Entre 1922 e 1939 foram construídos os primeiros edifícios com esses sistemas e em 1944, o assunto foi introduzido nas normas da AASHO (*American Association of State Highway Officials*), hoje conhecida como AASHTO.

Com o surgimento da ABNT NBR 8800:2008 a utilização de elementos estruturais mistos foi estimulada no Brasil, dado que a normativa contemplou recomendações para projetos de lajes, vigas e pilares mistos.

No Brasil, um grande destaque para a estrutura mista de aço e concreto é o edifício Concórdia Corporete (Figura 3), localizado em Nova Lima – MG, que

apresenta 172 m de altura contemplando 45 pavimentos. A edificação é composta por um núcleo rígido de concreto, por pilares mistos e lajes do tipo *Steel Deck* apoiadas sobre vigas metálicas.

Figura 3 - Concórdia Corporete



(a) em fase de construção



(b) Projeção da finalização do projeto

Fonte: Divulgação Bedê Engenharia de Estruturas

Outra obra de grande relevância é o Porto Atlântico Business Square, possível de se observar na Figura 4, localizado na região de Porto Maravilha no Rio de Janeiro que foi entregue no segundo semestre de 2016 e apresenta elementos similares aos encontrados no Concórdia Corporete como os pilares mistos, vigas metálicas e lajes em *Steel Deck*.

Figura 4 - Porto Atlântico Business Square



(a) em fase de lançamento da estrutura



(b) em fase final de acabamento

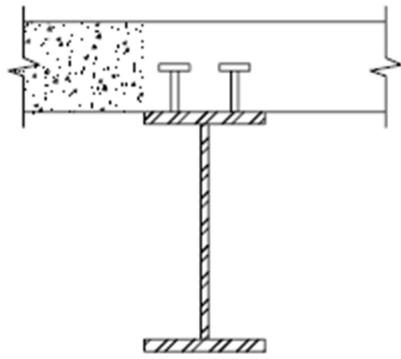
Fonte: Divulgação Bedê Engenharia de Estruturas

5.2 Viga mista

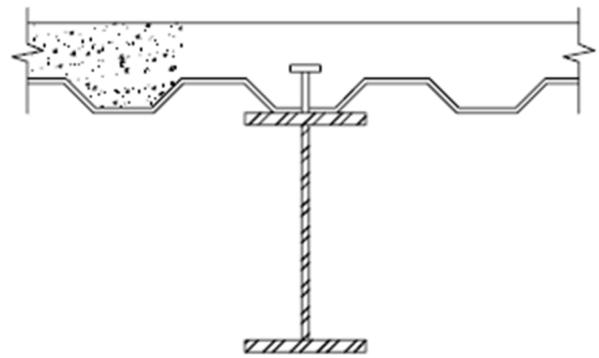
A ABNT NBR 8800:2008 define em seu anexo O a viga mista, como sendo um componente de aço simétrico em relação ao plano de flexão, que pode ser um perfil I, um perfil caixão, um perfil tubular retangular ou uma treliça, com uma laje de concreto acima de sua face superior.

Alva (2000) define as vigas mistas como sendo o resultado da associação de uma viga de aço, em geral um perfil do tipo “I”, com uma laje de concreto, cuja ligação é feita por meio de conectores de cisalhamento, soldados à mesa superior do perfil de forma que eles funcionem como um conjunto para resistir a flexão. A laje de concreto pode ser moldada em loco com a face inferior plana (Figura 5a), com uma forma de metal incorporada (*Steel Deck*) (Figura 5b) ou a laje pode ser pré-moldada conforme a Figura 6 e Figura 7.

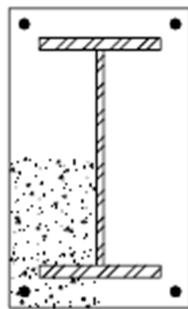
Figura 5 - Alguns dos tipos mais usuais de vigas mistas



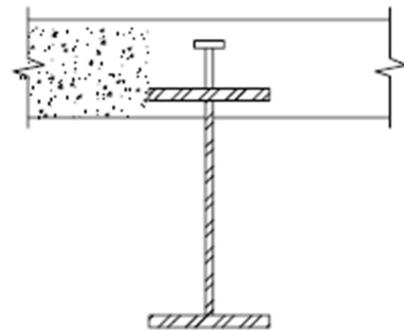
(a) Laje com face inferior plana



(b) Laje com forma de aço incorporada



(c) Viga de totalmente embutida no concreto



(d) Viga de parcialmente embutida no concreto

Fonte: Alva (2000) adaptado de Malite (1990)

Figura 6 - Laje de concreto pré-moldado

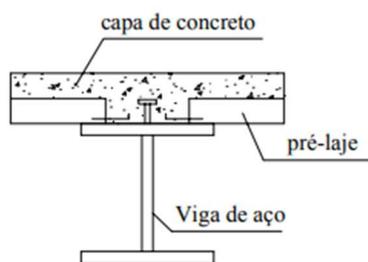


Figura 7 - Montagem de laje de concreto pré-moldado



Fonte: Alva (2000).

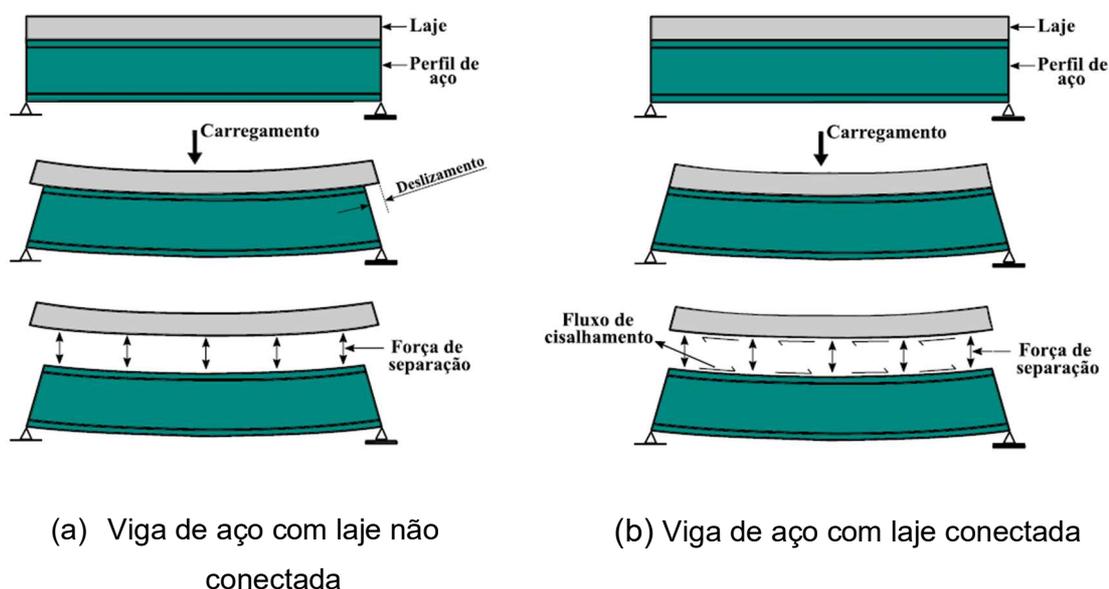
Segundo Lima (2021) a eficiência da viga mista aço-concreto é dependente da ação conjunta entre seus componentes. Para isso, deve ser garantida a transferência dos esforços longitudinais e transversais que ocorrem na interface aço-concreto. A transferência desses esforços entre os materiais acontece principalmente por meio de conectores de cisalhamento. Os conectores quando aplicados em vigas mistas resistem a forças de cisalhamento, a tendência dos materiais se separarem transversalmente (*uplift*) e ao deslizamento que aparece na interface entre os materiais.

As vigas mistas podem ser simplesmente apoiadas ou com continuidade nos apoios. As simplesmente apoiadas contribuem para a maior eficiência do sistema misto, pois a viga de aço trabalha predominantemente à tração e a laje de concreto à compressão, embora não seja muitas vezes a solução mais econômica (CHAVES, 2009).

5.3 Interação entre a superfície laje - perfil

Quando a estrutura de uma viga mista é submetida a um carregamento, os elementos deformam-se de maneiras diferentes, devido às propriedades diferentes dos materiais que constituem a viga. Uma maneira para garantir a solidariedade da peça é a inserção de conectores de cisalhamentos, onde sua função principal é evitar as forças de cisalhamento que acontecem na superfície de contato dos materiais e o deslocamento diferencial entre eles, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Viga mista submetida a flexão



Fonte: Lima (2021).

As vigas mistas podem apresentar graus de interações ditos como parciais (Figura 8a) ou totais (Figura 8b). A interação é dita total quando não ocorre deslizamento entre o perfil laje. Sabemos que na prática não é possível evitar a totalidade do deslizamento longitudinal devido à força de cisalhamento deformar os conectores, permitindo que exista um pequeno deslocamento. Assim, afirma-se que uma interação total acontece quando o deslizamento pode ser considerado desprezível. Na interação parcial o deslizamento acontece, tal que, não se pode desprezá-lo.

5.4 Ensaio *Push-out*

A norma europeia para estruturas mistas, a EN 1994-1-1:2004, padroniza e determina especificações para a execução do ensaio *Push-out*, que tem como objetivo avaliar o desempenho de conectores de cisalhamento em estruturas mistas (LIMA, 2018).

O ensaio tem como componentes duas lajes de concreto armado de dimensões 60x65x15 cm, um perfil de aço e os conectores de cisalhamento que

se deseja avaliar. A montagem consiste em anexar os conectores as duas mesas do perfil e concretar as lajes com os conectores embutidos na mesma. A Figura 9 apresenta a execução do ensaio *push-out*. O ensaio é feito aplicando uma carga na face do perfil metálico enquanto as duas lajes são o apoio para o modelo, entre a superfície do concreto e o perfil de aço é aplicada uma graxa para reduzir o atrito entre essas duas partes e o conector seja o único responsável por resistir ao deslizamento que venha a acontecer devido a aplicação da carga. Durante o ensaio, por meio de sensores é medido o deslizamento longitudinal entre o perfil e a laje, desta forma ao fim do ensaio conseguiremos obter uma curva de carga x deslizamento.

Figura 9 - Ensaio *push out*



Verissimo (2007)

A análise do conector de cisalhamento consiste na determinação de quatro características básicas: resistência, rigidez, ductilidade e *uplift*. Somente os três primeiros parâmetros são obtidos a partir da curva carga-deslizamento (LIMA, 2021).

5.4.1 Ensaio *push-out* desenvolvido por Barbosa (2016)

Em sua pesquisa, Barbosa (2016) elaborou uma série de 24 ensaios *push-out*, sendo 3 referentes ao *stud bolt*, 12 ao conector treliçado de ângulo reto e 9 para o conector treliçado isósceles, conforme descrito na Figura 10.

Para a execução dos ensaios foi utilizado o perfil metálico W250x73 que é um equivalente ao perfil indicado pela EN 1994-1-1:2004 para esse ensaio, podemos ver suas dimensões na Figura 11.

Figura 10 - Modelos de ensaio *push-out* de Barbosa (2016)

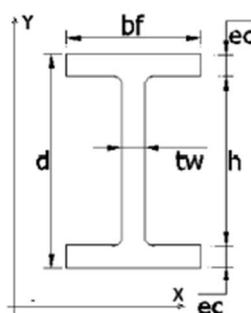
Tipos de Modelos	Nomenclatura dos Modelos	Quantidade de Modelos	Armadura de Cisalhamento	
			Tipo de conector	Diâmetro (ϕ)
S	S19	3	<i>stud bolt</i>	19,0 mm
R	V	3	TR - Treliçado Retângulo	12,5 mm
	R8	3	TR - Treliçado Retângulo	8,0 mm
	R10	3	TR - Treliçado Retângulo	10,0 mm
	R12,5	3	TR - Treliçado Retângulo	12,5 mm
I	I8	3	TI - Treliçado Isósceles	8,0 mm
	I10	3	TI - Treliçado Isósceles	10,0 mm
	I12,5	3	TI - Treliçado Isósceles	12,5 mm

Fonte: Barbosa (2016)

Figura 11 - Perfil metálico adotado para o ensaio *push-out* por Barbosa (2016)

Medidas	Und
$b_f = 254$	mm
$d = 253$	mm
$h = 225$	mm
$e_c = 14,2$	mm
$t_w = 8,6$	mm

Seção transversal



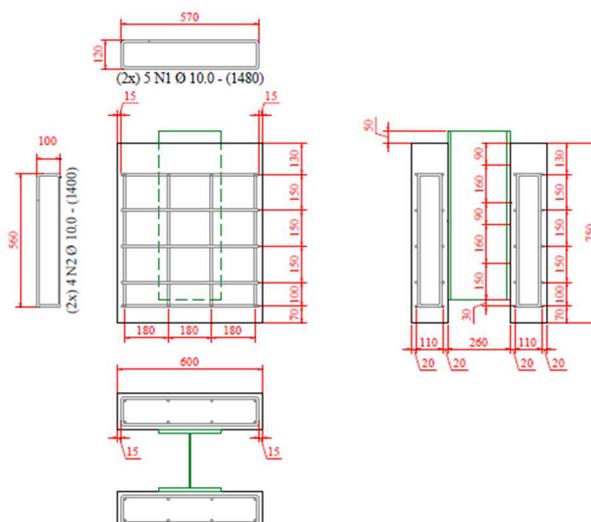
(a) Dimensões da seção transversal

(b) Perfil utilizado nos modelos experimentais

Fonte: Barbosa (2016)

A Figura 12 apresenta a geometria do modelo utilizado para a primeira concretagem do ensaio. A partir dessa geometria foi elaborada a modelagem numérica desses elementos.

Figura 12 - Dimensões do ensaio *push-out*



Fonte: Barbosa (2016)

5.5 Ductilidade e rigidez dos conectores de cisalhamento

Os conectores de cisalhamento têm como funções principais, absorver esforços cisalhantes em duas direções e impedir a separação entre a viga de aço e a laje de concreto (MALITE, 1990).

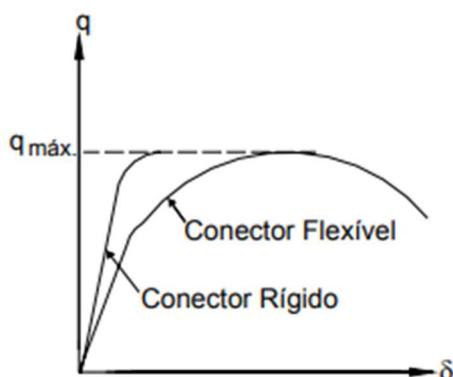
Segundo Qureshi, Lam e Ye (2011), a eficiência das vigas mistas está ligada em garantir a transferência dos esforços entre o perfil de aço e a laje de concreto.

Os conectores de cisalhamento podem ser classificados em relação a ductilidade em duas categorias, os conectores rígidos e flexíveis. Os rígidos são aqueles que não se deformam quando submetidos a uma carga de serviço, de forma que o deslocamento relativo entre o perfil e o concreto seja nulo. Em contrapartida, a ruptura desse conector é do tipo frágil, levando a um colapso rápido da estrutura, o que é indesejável para a segurança estrutural da edificação. Já os conectores flexíveis deformam quando existe a presença de cargas, assim permitindo o deslizamento entre o aço e o concreto, apresentando assim uma ruptura dúctil (Figura 13).

Sobre o modo de falha, um conector flexível não é propriamente ideal em algumas situações porque se deforma sob carga e descarga, portanto, é propenso a fadiga. Um conector rígido, por outro lado, tende a não sofrer problemas de fadiga. O conector ideal é aquele que apresenta um comportamento

rígido em sua carga de serviço e características dúcteis em seu estado limite último (VERÍSSIMO,2007).

Figura 13 - Curva característica dos conectores



Fonte: David (2007)

5.6 Tipos de conectores

A ABNT NBR 8800:2008 apresenta dois tipos de conectores de cisalhamento, o do tipo perfil “U” e o *stud bolt*.

5.6.1 Conector “U”

O conector de cisalhamento “U” é produzido a partir de perfis em “U” ou “C”. Por causa da espessura da sua alma ser reduzida, este conector apresenta uma reduzida inércia a força normal e maior susceptibilidade a deformações. Entretanto, esse conector apresenta uma melhor distribuição de tensões na região do concreto que envolve o conector quando comparado ao conector *stud bolt* (Cavalcante, 2010).

A ligação do conector com a mesa do perfil deve ser garantida por solda contínua pelo menos nas duas extremidades da mesa do conector, como na Figura 14, com essa solda tendo uma resistência mínima com valor de 1,25 a resistência de cálculo do conector.

Figura 14 - Instalação de conectores em perfil U



Fonte: Verissimo (2007)

Segundo a NBR 8800:2008 a força resistente de cálculo para o conector de cisalhamento em perfil laminado “U” com uma altura mínima de 75 mm totalmente embutida em uma laje maciça de concreto plana apoiada em viga de aço é dada pela Equação (1)

$$Q_{Rd} = \frac{0,3(t_{fcs} + 0,5t_{wcs})L_{cs}\sqrt{f_{cs}E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (1)$$

Onde

t_{fcs} é a espessura da mesa do conector, tomada a meia distância entre a borda livre e a face adjacente da alma;

t_{wcs} é a espessura da alma do conector;

L_{cs} é o comprimento do perfil U.

Verissimo (2007) lista algumas dificuldades associadas ao uso desse tipo de conector de cisalhamento:

- em sistemas com pré-laje, geralmente o espaço disponível sobre a mesa da viga metálica é insuficiente para o emprego do perfil U;

- o perfil U é incompatível com a fôrma metálica e geralmente é utilizado em sistemas com laje maciça;
- a produtividade na instalação é baixa.

5.6.2 stud bolt

Desenvolvido nos anos de 1940 por Nelson Stud Welding o conector de cisalhamento tipo *stud bolt* é hoje, no brasil e no mundo, o mais utilizado em sistemas estruturais mistos (CÂNDIDO-MARTINS, COSTA-NEVES E VELLASCO, 2010; KIM et al. 2016; NGUYEN E KIM 2009). Isso por causa da alta produtividade devido a facilidade de aplicação dos conectores. A ligação do conector a mesa do perfil metálico é feita por meio de solda realizada por uma pistola elétrica (Figura 15) projetada exclusivamente para a fixação deste conector.

Figura 15 - Aplicação do conector stud



Fonte: Kotinda (2006)

Entretanto, para o processo de solda é necessário que a pistola seja ligada à uma fonte de considerável potência elétrica. Segundo Veríssimo (2007) é necessário um gerador de 225kVA para que se possa fazer a solda. Como o maquinário necessário tem um alto custo e é de difícil aquisição, pode muitas vezes inviabilizar a utilização desses conectores e até mesmo impedir o modelo construtivo adotado, dependendo da região do país.

Assim como o conector “U”, o *stud bolt* também tem o dimensionamento da sua resistência apresentado na NBR 8800:2008. A força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento tipo *stud bolt* é dada pelo menor dos dois valores das Equações (2) e (3).

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (2)$$

$$Q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (3)$$

γ_{cs} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações excepcionais;

A_{cs} é a área da seção transversal do conector;

f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

R_g é um coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;

R_p é um coeficiente para consideração da posição do conector.

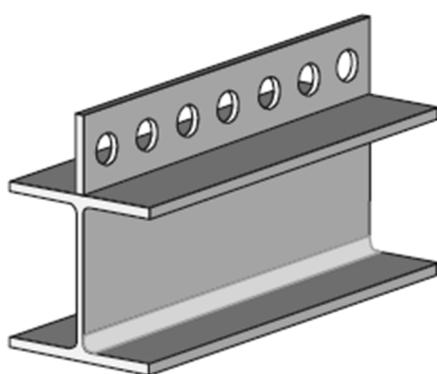
5.6.3 Conectores alternativos

Muitos Conectores alternativos surgiram a fim de sanar as deficiências de resistência, instalação, fabricação, rigidez e custo dos conectores normatizados até então. Esta seção tem por finalidade apresentar os conectores de cisalhamento alternativos aos conectores “U” e o *Stud bolt*.

5.6.3.1 Perfobond e Crestbond

O conector Perfobond surgiu nos anos 80, do estudo da empresa alemã *Leonhardt, Andrä and Partners*, que estudaram vários conectores de cisalhamento rígidos a fim de descobrir alternativas ao conector tipo *stud bolt*, que apresenta baixo desempenho quando submetido a cargas cíclicas sendo propenso a fadiga, por se tratar de um conector flexível. A geometria do Perfobond consiste em uma chapa de aço com furos circulares, soldada longitudinalmente sobre o perfil metálico conforme Figura 16.

Figura 16 - Conector Perfobond



(a) Geometria do conector



(b) Aplicação do conector

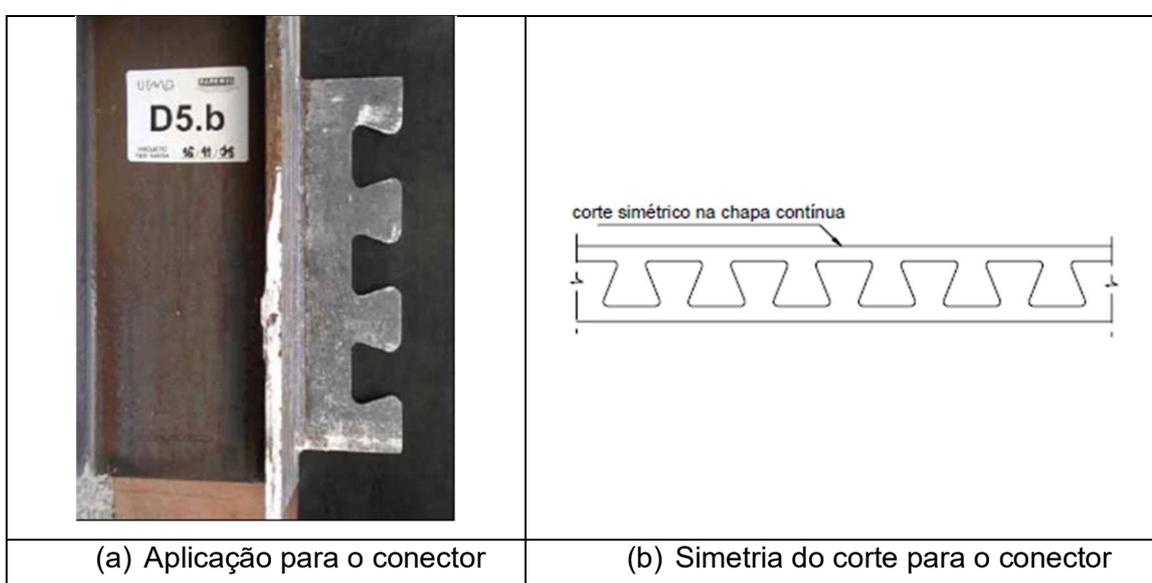
Fonte: (a) Verissimo (2007), (b) Souza (2014).

Esse conector foi idealizado a partir da necessidade de um conector rígido, que para carregamentos relativamente elevados, não permitisse o deslizamento relativo entre o aço e o concreto e ao mesmo tempo somente envolvesse deformações elásticas (VERÍSSIMO, 2007). Uma desvantagem desse conector é o fato do seu formato dificultar a montagem da armadura da parte inferior da laje quando as barras devem atravessar suas aberturas.

Com a finalidade de sanar este problema, Verissimo em 2007 propôs um conector com uma geometria que facilitasse o arranjo da armadura e que pudesse ser feito por meio de um corte simétrico, onde a partir de um único corte fosse possível obter 2 peças, como é demonstrado na Figura 17.

O programa experimental de Veríssimo analisou 41 ensaios *push out*, onde foi constatado que a capacidade de carga do conector Crestbond é um pouco menor do que a de um Perfobond de mesmas dimensões. Outros resultados obtidos foram que sua rigidez para cargas de serviço e o limite de proporcionalidade para os conectores em chapa contínua são superiores aos apresentados pelos conectores *stud bolt*, e que por fim o Crestbond é um conector de cisalhamento viável para estrutura mista de aço concreto.

Figura 17 - Geometria do conector crestbond

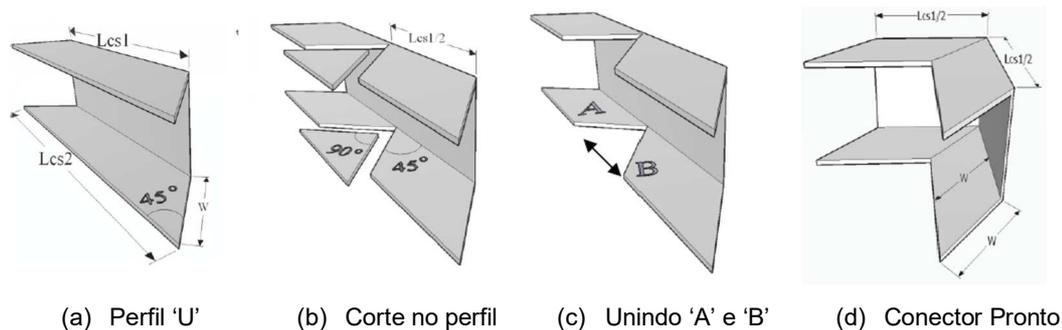


Fonte: (a)Silva (2013), (b)Veríssimo (2007)

5.6.3.2 Conector V

Cavalcante (2010) idealizou este conector em formato de “V” que pode ser fabricado a partir de um perfil metálico “U” como demonstrado na Figura 18. O programa experimental envolveu 16 ensaios de *push-out* com a finalidade de avaliar a ductilidade, *uplift*, fissuração do concreto, deformação e modos de colapso do conector. Por fim, foi constatado que o conector de cisalhamento em “V” apresentou uma considerável área de contato assim como o conector em “U”, reduzindo efeitos de fissuração no concreto, também apresenta uma ligação do perfil com o concreto mais rígida e existem menos deslizamentos entre o perfil de aço e a laje de concreto.

Figura 18 - Fabricação do conector 'V'



Fonte: Cavalcante (2010)

5.6.3.3 Conector de cisalhamento Trelaçado

Barbosa (2016) idealizou um conector construído com vergalhões de aço para concreto armado CA-50 dobrado em forma de triângulo, podendo ter a forma de um triângulo isósceles (TI) ou um triângulo retângulo (TR), conforme a Figura 19. O autor inicialmente elaborou uma modelagem numérica baseada no Método dos Elementos Finitos, onde foi possível estudar a viabilidade da geometria dos conectores.

Com resultados numéricos favoráveis, o programa experimental do autor contou com a execução de 24 modelos experimentais de ensaio *push-out*, sendo 3 destinados ao *stud bolt* e 21 ao estudo dos conectores trelaçados com a variação do diâmetro do vergalhão entre 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm.

O resultado obtido pela pesquisa em relação ao rompimento do modelo, foi que, para os conectores *stud bolt* a ruptura aconteceu na solda do conector com a mesa, enquanto para os ensaios experimentais dos conectores trelaçados a ruptura, foi caracterizada pelo rompimento da haste submetida a tração na região próxima a mesa do perfil metálico, garantindo que a laje ainda permanecesse interligada com o perfil graças a haste sob compressão do conector. Em uma situação de uso cotidiano esse comportamento evitaria o total destacamento das lajes dos perfis metálicos.

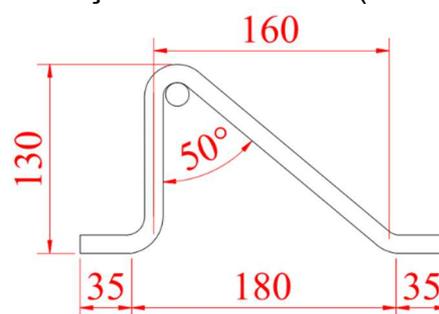
Como resultado, foi possível classificar os conectores avaliados como dúcteis de acordo com os critérios da EN 1994-1-1:2004, apresentando dessa forma o comportamento ideal para a ruptura. Quanto a capacidade resistente dos modelos, o conector isósceles de 12,5 mm apresentou os melhores resultados,

com carga de ruptura de 104,50 kN, seguido pelo conector reto de 12,5 mm com 87,50 kN e o conector *stud bolt* de 19 mm com carga última de 62,45 kN.

Figura 19 - Geometria dos conectores treliçados de Barbosa (2016)



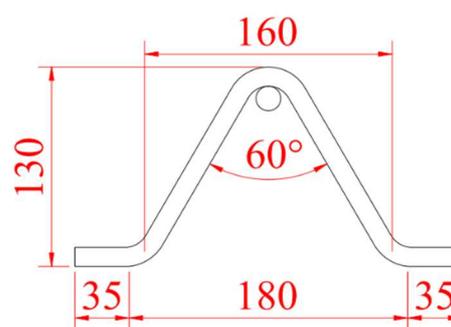
(a) Conector treliçado reto - Ø 12,5mm



(b) Conector treliçado reto - Dimensões



(c) Conector treliçado isósceles -
Ø 12,5mm



(d) Conector treliçado isósceles -
Dimensões

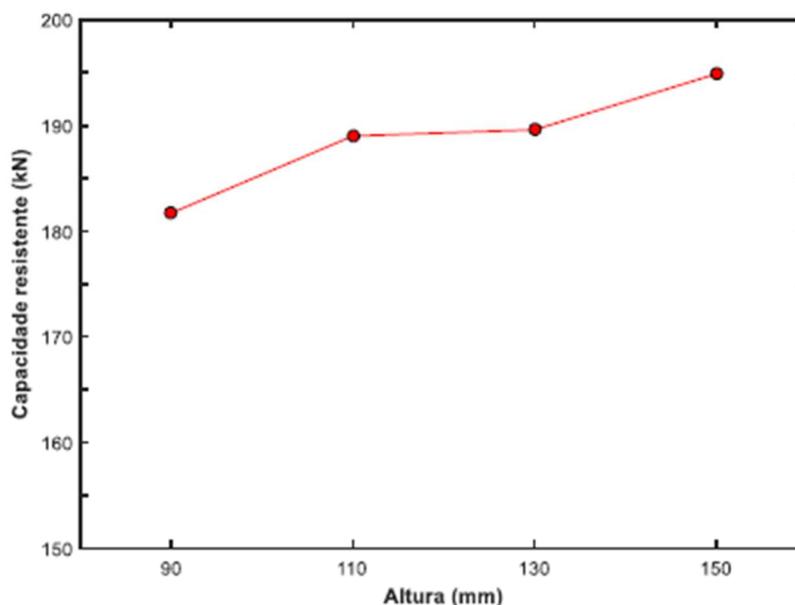
Fonte: Barbosa (2016)

Buscando aprofundar o entendimento do comportamento desse tipo de conector, Lima (2018) elaborou simulações numéricas por meio do Método dos Elementos Finitos, onde foram analisadas as variações de altura e ângulo de abertura para o conector treliçado isósceles. O modelo numérico de Lima (2018) foi validado por meio dos dados experimentais do ensaio *push out* de Barbosa (2016).

Na pesquisa, Lima sugere a variação da altura do conector isósceles para valores de 90, 110, 130, 150 mm, mantendo constante o ângulo de abertura entre as hastes de 60°. Para o estudo da variação do ângulo de abertura, foi avaliado as angulações de 40°, 50°, 60°, 70°, 80° enquanto sua altura continuou com um valor fixo de 90 mm.

Os resultados obtidos por Lima (2018) constataram que com o aumento da altura do conector a resistência também aumenta, entretanto, valores não muito significativos, é possível ver esse resultado na Figura 20. As alterações na capacidade resistente do Conector Trelaçado (CT) podem ser explicadas pelo fato de a ruptura dos conectores trelaçados ocorrer nas hastes, próximo a ligação do conector com o perfil (LIMA *et al.*, 2020; BEZERRA *et al.*, 2018-a).

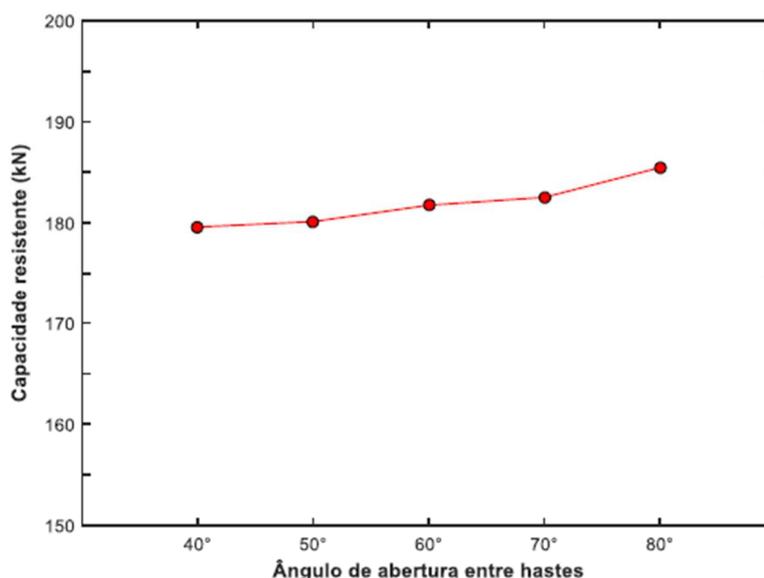
Figura 20 - Altura do conector X capacidade resistente



Fonte: Lima (2018)

Os resultados obtidos quando se avaliou a variação do ângulo de abertura interno entre as hastes do conector elevaram-se com o aumento da angulação. Entretanto não existe variação significativa da resistência como podemos ver na Figura 21. A maior resistência foi de 185,46 kN para o conector com 80° de abertura.

Figura 21 – Ângulo de abertura X capacidade resistente



Lima (2018)

Lima (2018) conclui que para estruturas mistas de aço concreto de médio e pequeno porte, onde são utilizadas lajes de espessuras menores, o conector treliçado isósceles é uma solução viável com capacidade resistente relativamente alta.

5.7 Modelagem Numérica

A análise numérica com o Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta que possibilita o estudo do comportamento dos conectores de cisalhamento. Em algumas situações a análise numérica é o único jeito de se estudar um certo fenômeno (LIMA, 2021).

Segundo El-Lobody e Young (2006) quando comparamos os ensaios experimentais e a modelagem numérica em relação ao estudo de conectores de cisalhamento, a modelagem em elementos finitos é considerada uma alternativa eficaz levando em conta o tempo e os custos envolvidos no processo do ensaio *push-out*.

Lam e El-Lobody (2005) desenvolveram um modelo numérico no Método dos Elementos Finitos de conectores de cisalhamento tipo *stud bolt* em vigas mistas e obtiveram resultados de capacidade resistente do conector, relação carga x deslizamento longitudinal e modos de rupturas similares a resultados experimentais.

Quresh, Lam e Ye (2010) utilizaram uma análise numérica via ABAQUS para averiguar o comportamento do conector *stud bolt* com a variação de espaçamento e *layout*. Foi modelado um ensaio *push-out* onde foram levados em conta a não linearidade geométrica dos materiais e a aplicação de carga de forma lenta, para garantir uma solução quase estática.

Dutra (2014) desenvolveu um estudo sobre o conector tipo Crestbond por meio de modelagem numérica com o programa ABAQUS. Foi levado em conta na análise a não linearidade do comportamento dos materiais e o modelo de dano plástico. O estudo verificou a variação de parâmetros, como: posição e diâmetro das barras de flexão da laje, diâmetro de abertura do conector, resistência do concreto entre outros. Foram elaborados 88 modelos do ensaio *push-out* pelo Método dos Elementos Finitos. Os resultados, forma satisfatórios para a análise dos parâmetros estudados e a ductilidade dos conectores *Crestbond*.

Bonilla *et al.* (2015) elaboraram um estudo acerca do conector *stud bolt* por meio dos elementos finitos, para isso modelaram numericamente ensaios do tipo *push-out*. Nesse trabalho foi analisado o comportamento dos materiais no regime de comportamento não linear, foi utilizado no aço um modelo bi-linear com o critério de falha de Von Mises e o Modelo de Danos Plásticos para concreto. Por fim, o trabalho conclui que existe uma boa correspondência entre os resultados numéricos obtidos e os experimentais.

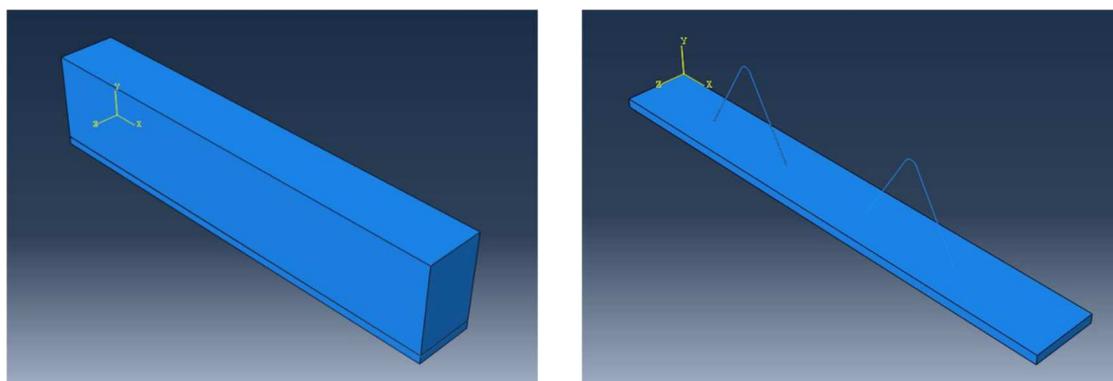
Bezerra *et al.* (2018) conduziram a elaboração de um modelo numérico tridimensional para o estudo do comportamento dos conectores de cisalhamento treliçado, adotando no modelo o comportamento não linear dos materiais. Os resultados obtidos foram validados com os dados experimentais de Barbosa (2016).

Moura (2022) elaborou um estudo na Universidade Federal do Ceará sobre o comportamento do conector treliçado em uma viga mista de tamanho real por meio do Método dos Elementos Finitos.

Para o estudo foi necessário o desenvolvimento de um modelo numérico de um ensaio *push-out*. O modelo foi constituído de elementos lineares para a modelagem do conector treliçado isósceles e elementos sólidos para a laje de concreto e o perfil de aço, junto a isso, o ensaio *push-out* foi montado com apenas um trecho da laje de concreto e apenas metade da mesa do perfil metálico,

com a finalidade de que fosse possível obter uma grande economia computacional, que resultou em uma obtenção ágil dos resultados (Figura 22).

Figura 22- Modelo numérico de Moura (2022)



(a) Laje de concreto

(b) Mesa do perfil e conectores

Fonte: Moura (2022)

Por fim, o autor apresentou gráficos sobre o deslizamento longitudinal e a separação vertical (*Uplift*) versus o carregamento e também as deformações e tensões do conector modelado de forma numérica. Todos esses dados foram comparados com os obtidos experimentalmente por Barbosa (2016) e validados.

A metodologia de modelagem utilizada neste presente trabalho foi retirada de Moura (2022), em que o conector foi definido por meio de elementos lineares. Entretanto, em relação a geometria foi optado por fazer a modelagem de $\frac{1}{4}$ do ensaio *push-out* ensaiado por Barbosa (2016), além de estudar o conector treliçado reto, por se tratar de um tipo de conector pouco abordado em trabalhos acadêmicos quando comparados com o conector isósceles que já foi estudado por Lima (2018), Moura (2022) e outros autores.

6 METODOLOGIA PARA A ELABORAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

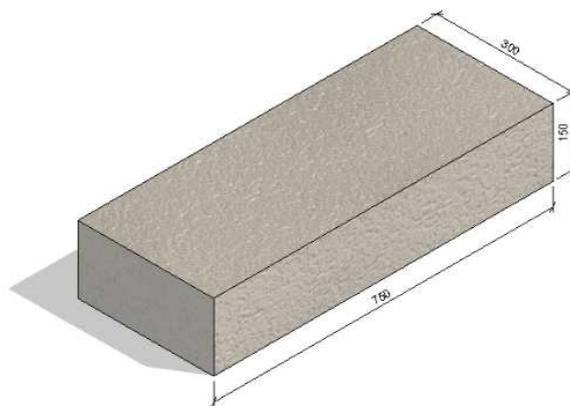
Essa seção tem por objetivo elucidar a modelagem numérica conduzindo um passo a passo, descrevendo os processos e as propriedades dos materiais utilizados.

6.1 Partes constituintes

O modelo numérico é constituído de uma laje de concreto, de um perfil metálico, dois conectores de cisalhamento e armaduras para a laje de concreto. Assim, formando um conjunto que corresponda a $\frac{1}{4}$ da geometria utilizada nos ensaios *push-out* elaborado por Barbosa (2016) descrita na Figura 12. Essa estratégia é possível devido as simetrias existentes no conjunto do ensaio e resultará em uma maior economia computacional e uma maior agilidade na resolução do programa. Outros trabalhos também fizeram uso dessa estratégia e obtiveram resultados satisfatórios, como, Cardoso (2018), Bezerra *et al* (2018), Fortes (2018), Lima (2018).

Como o modelo fez uso somente de $\frac{1}{4}$ da geometria experimental onde são usadas duas lajes, é modelada somente uma faixa de laje obtida através da extrusão com dimensões de: 750x150x300 mm, conforme a Figura 23.

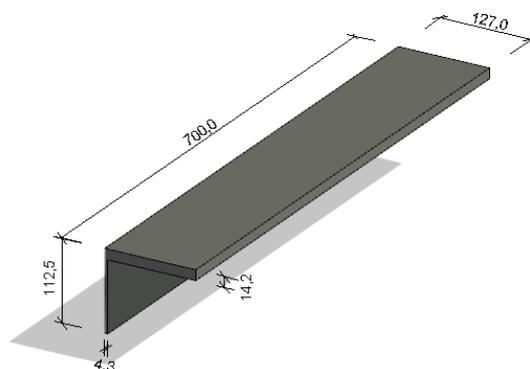
Figura 23 - Dimensões da laje de concreto modelada



Fonte: Autoria própria

Para o ensaio foi utilizado o perfil metálico W250x73 que tem suas dimensões descritas na Figura 11. A Figura 24 exhibe o perfil utilizado na modelagem numérica do ensaio que representa $\frac{1}{4}$ da seção transversal do perfil W250x73, sendo a dimensão da mesa de 254 mm, altura da seção transversal de 253 mm e comprimento de 700mm.

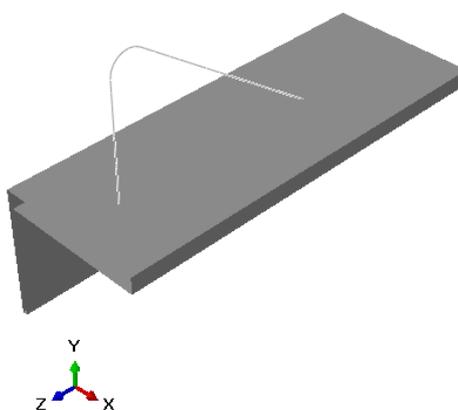
Figura 24 - Dimensões do perfil metálico modelada



Fonte: Autoria própria

O conector treliçado para fins de simplificação computacional foi modelado com a estrutura de um fio, sendo a seção escolhida circular de raio igual a 6,25 mm, assim chegando a um conector de 12,5 mm de diâmetro. A única diferença do conector modelado para o que foi ensaiado por Barbosa (2016), trata-se que os pontos de apoio entre o conector e a mesa do perfil metálico, que no modelo experimental existiam abas para a aplicação de solda, no modelo numérico foram pontos onde existem restrições que simularam esse comportamento, conforme é possível observar na Figura 25.

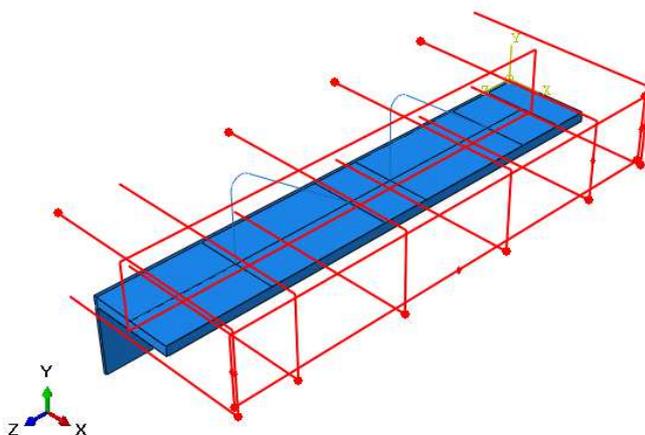
Figura 25 - Conector Treliçado Reto



Fonte: Autoria própria

As armaduras da laje, ilustradas na Figura 26, foram construídas por meio de uma estrutura de fio similar ao processo de modelagem do conector treliçado, sendo essa armadura com o diâmetro de 10 mm. Sua geometria segue as especificações da EN 1994-1-1:2004.

Figura 26 - Armadura da laje



Fonte: Autoria própria

6.2 Definição dos materiais

6.2.1 Aço do perfil metálico

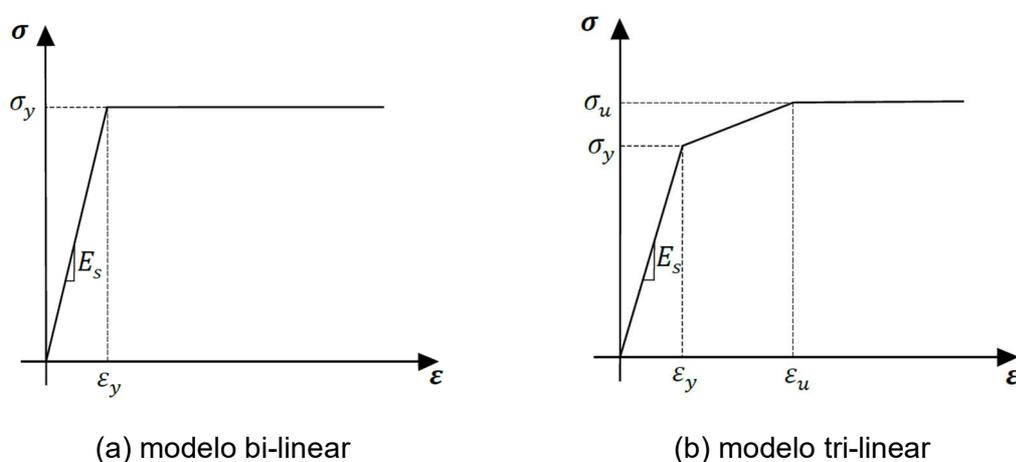
Para essa modelagem o perfil não é foco da análise, então foi adotada uma simplificação em relação às suas propriedades mecânicas. De acordo com Tristão (2002), Barbosa (2016) e Lima (2018) o perfil de aço no ensaio *push-out* tem como característica se manter em seu regime elástico. Sendo assim, na modelagem o perfil apresenta somente características elásticas, com módulo de elasticidade (E) com valor de 210000 MPa e coeficiente de Poisson (ν) de 0,3.

6.2.2 Aço dos conectores de cisalhamento

Para o aço do conector, visto que é o alvo do estudo do presente trabalho, tem-se uma caracterização mais complexa do seu material constituinte, foi feito para isso o uso de um modelo constitutivo elástico-plástico.

Segundo Lima (2018), o comportamento uniaxial para o aço pode ser modelado, de uma forma simplificada, por uma curva de tensão x deformação bi-linear ou tri-linear (Figura 27).

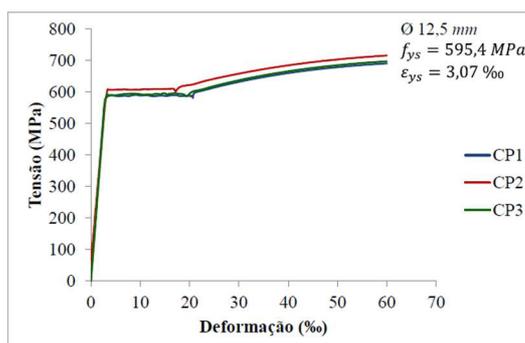
Figura 27 - Comportamento uniaxial do aço



Fonte: Lima (2018)

Para este estudo foi adotado o comportamento tri-linear do aço que constitui o conector treliçado, Lima (2018) e Moura (2022) fizeram uso dessa curva, e extraíram resultados expressivos. Para os valores inseridos no *software* foram usados os valores encontrados por Barbosa (2016), descritos na Figura 28, os pontos notáveis para essa curva estão expostos na Tabela 1.

Figura 28 - Curva tensão x deformação para o aço



Fonte: Barbosa (2016)

Tabela 1 - Propriedade mecânicas do aço utilizado no modelo experimental

\emptyset	f_{ys} (MPa)	ϵ_{ys} (%)	f_u (MPa)	E_s (GPa)
12,5	595,3	3,04	716,6	195,3

Fonte: Barbosa (2016)

6.2.3 Concreto para a laje

O Concreto é um material bastante complexo quando comparado ao aço no que se diz respeito a modelagem. Esse fato acontece devido ao seu critério de falha que é distinto quando esse material é submetido a tração ou compressão. A falha do concreto na tração acontece em razão da fissuração, enquanto a falha devido a compressão acontece por causa do esmagamento do concreto.

Esse comportamento de não-linearidade do concreto é advindo do processo de fissuração, que degrada o material durante um carregamento. Com isso, pode-se dizer que a deformação plástica (permanente) no concreto, pelo menos em seus estágios iniciais, é causada pela degradação da rigidez (LUBLINER et al., 1989).

Para essa modelagem foi utilizado o modelo construtivo *Concrete Plastic Damage Model* que faz uso dos modelos plásticos de modelagem levando em conta a degradação devido ao processo de fissuração do material.

6.2.3.1 Parâmetros plásticos

Os parâmetros plásticos são variáveis que definem e modelam o concreto segundo o *Concrete Plastic Damage Model*.

Os valores usados para a modelagem foram os valores expostos na Tabela 2, que são os mesmos usados por Lima (2018).

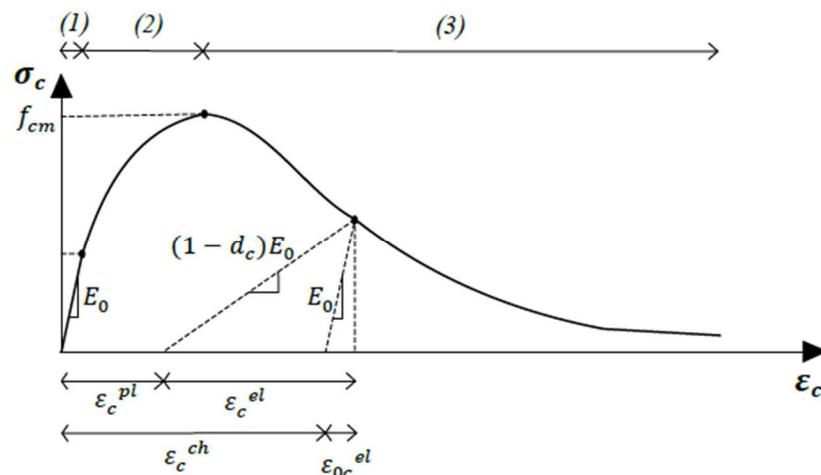
Tabela 2 - Resumo dos parâmetros plásticos

φ	K_c	f_{b0}/f_{c0}	ϵ
13°	0,7	1,16	0,1

6.2.3.2 Comportamento uniaxial do concreto à compressão

A Figura 29 mostra a curva tensão x deformação uniaxial do concreto à compressão, dividida em 3 partes, a primeira dela que corresponde a valores entre 0 e $0,4f_{cm}$, corresponde a um trecho de comportamento linear conforme a equação (4) (*fib Model Code 2010, 2012*).

Figura 29 - Comportamento uniaxial do concreto a compressão



Fonte: Lima (2018)

$$\sigma_{c(1)} = E_0 \epsilon_c \quad (4)$$

E_0 é o módulo de elasticidade secante do concreto e definido segundo a Equação (7).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (5)$$

$$E_{ci} = 10000 f_{cm}^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$E_0 = \left(0,8 + 0,2 \frac{f_{cm}}{88}\right) E_{ci} \quad (7)$$

desta forma:

f_{cm} é resistência média do concreto à compressão;

f_{ck} a resistência característica do concreto;

E_{ci} o módulo de elasticidade inicial.

A segunda região, que abrange de $0,4f_{cm}$, a f_{cm} é regida pela equação (8).

$$\sigma_{c(2)} = \frac{E_{ci} \frac{\varepsilon_c}{f_{cm}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}}\right)^2}{1 + \left(E_{ci} \frac{\varepsilon_{cm}}{\varepsilon_{cm}} - 2\right) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}}} f_{cm} \quad (8)$$

onde ε_{cm} corresponde ao valor de deformação média.

A terceira região descreve o *softening* na compressão conforme a Equação (9)

$$\sigma_{c(3)} = \left(\frac{2 + \gamma_c f_{cm} \varepsilon_{cm}}{2 f_{cm}} - \gamma_c \varepsilon_c + \frac{\varepsilon_c^2 \gamma_c}{2 \varepsilon_{cm}}\right)^{-1} \quad (9)$$

$$\gamma_c = \frac{\pi^2 f_{cm} \varepsilon_{cm}}{2 \left[\frac{G_{ch}}{l_{eq}} - 0,5 f_{cm} \left(\varepsilon_{cm} (1 - b) + b \frac{f_{cm}}{2 \varepsilon_{cm}}\right)\right]^2} \quad (10)$$

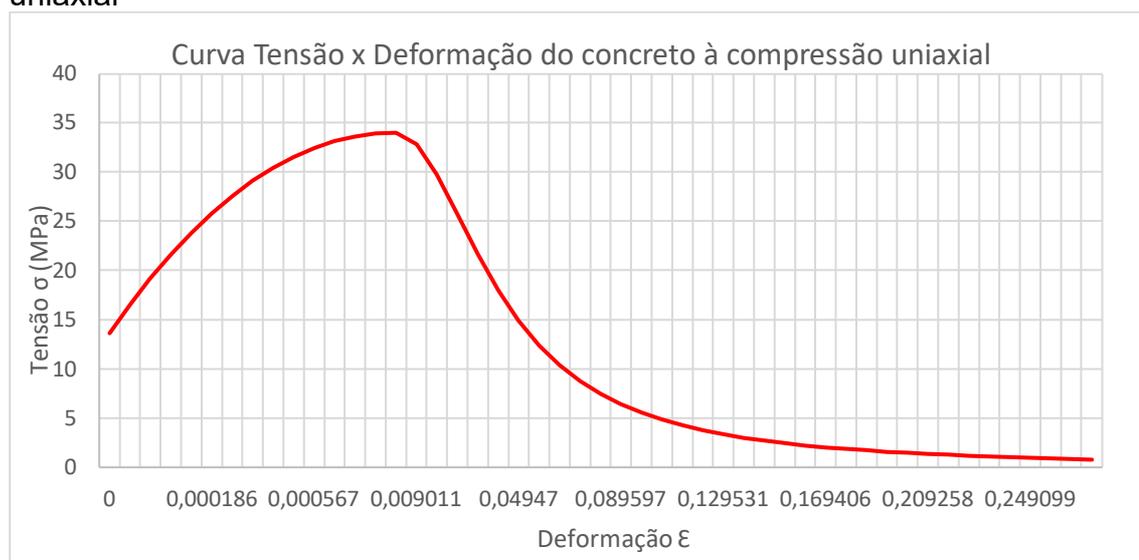
$$b = \frac{\varepsilon_c^{pl}}{\varepsilon_c^{ch}} \quad (11)$$

O parâmetro γ_c é o responsável em controlar a área sob a curva (terceiro trecho). Segundo Krätzig e Pölling (2004) a área sob a curva deve ser igual à energia de esmagamento localizada, dada pela relação G_{ch}/l_{eq} . A deformação última à compressão do concreto é definida de modo que a restrição acima discutida seja atendida.

Para o valor de b foi adotado o valor de 0,9 segundo Lima (2018). Esse valor é obtido a partir da construção da curva de tensão x deformação, onde dessa curva podemos obter o valor médio de b por meio de um processo iterativo, o valor desse parâmetro acaba por convergir com o seu valor médio.

O gráfico da Figura 30 apresenta os valores de tensão x deformação que foram inseridos no ABAQUS para descrever esse comportamento do concreto.

Figura 30 - Curva dos valores de tensão x deforma do concreto à compressão uniaxial



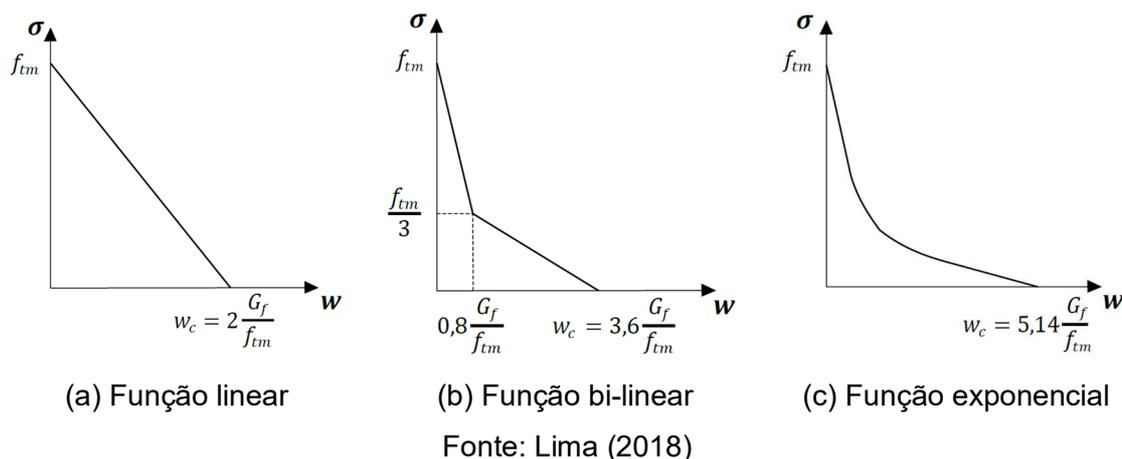
Fonte: Autoria própria

6.2.3.3 Comportamento uniaxial do concreto à Tração

Existem três caminhos distintos que podem ser tomados para definir o *softening* na tração do concreto. Esses caminhos estão representados na Figura 31.

O primeiro deles trata-se de uma função de comportamento linear em que a razão entre a queda de resistência e a abertura da fratura é constante. No segundo, a reta única agora se divide em duas retas. No último dos caminhos, o mais realistas deles, foi proposto por Cornellissen, Hordijk e Reinhardt (1986), e se trata de uma função exponencial que representa esse comportamento de “amolecimento” que acontece ao aço na sua tração.

Figura 31 - *Softening* na tração do concreto em relação a abertura de fissura



Na Figura 31 f_{tm} corresponde a resistência à tração média, G_f é a energia de fratura por unidade de área e w_c é a abertura de fratura crítica. De acordo com o *fib Model Code 2010* (2012), f_{tm} e G_f são definidos segundo Equações (12) e (13).

$$f_{tm} = 0,3016 f_{ck}^{2/3} \quad (12)$$

$$G_f = 0,073 f_{cm}^{0,18} \quad (13)$$

Com base na energia de fratura, Oller (1988) define que a energia de esmagamento do concreto (G_{ch}) na Equação (14).

$$G_{ch} = \left(\frac{f_{cm}}{f_{tm}} \right)^2 G_f \quad (14)$$

Cornellissen, Hordijk e Reinhardt (1986) propuseram a equação (15) que descreve o comportamento de *softening* da tração. Percebem-se as seguintes condições de contorno para essa equação $\sigma_t(0) = f_{tm}$ e $\sigma_t(w_c) = 0$, condições essas que já eram esperadas, a primeira afirma que quando a abertura da fissura é mínima a resistência do concreto é máxima, já a segunda condição implica em que se a abertura é máxima a resistência é mínima.

$$\frac{\sigma_t(w)}{f_{tm}} = \left[1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2} \quad (15)$$

Ainda sendo os valores de $c_1 = 3$ e $c_2 = 6,93$ segundo Cornellissen, Hordijk e Reinhardt (1986).

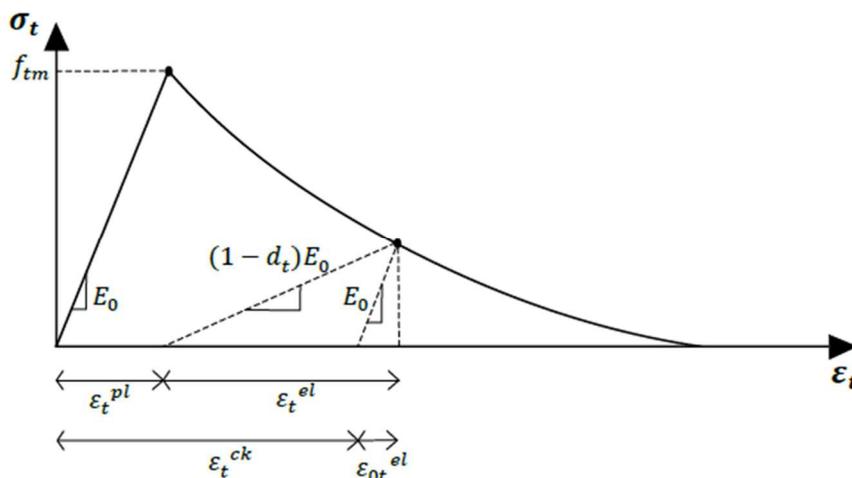
A abertura de fissura crítica w_c é calculada segundo Equação (16).

$$w_c = 5,14 \frac{G_f}{f_{tm}} \quad (16)$$

Segundo Lima (2018) como a perda de resistência à tração é função da abertura de fissuras no concreto, é possível afirmar que o *softening* também pode ser definido em função da deformação do concreto.

De acordo com Alfarah, López- Almansa e Oller (2017), os valores de deformação que definem o segundo trecho da relação tensão x deformação da Figura 32 pode ser obtidos pela Equação (17).

Figura 32 - comportamento uniaxial do concreto a tração



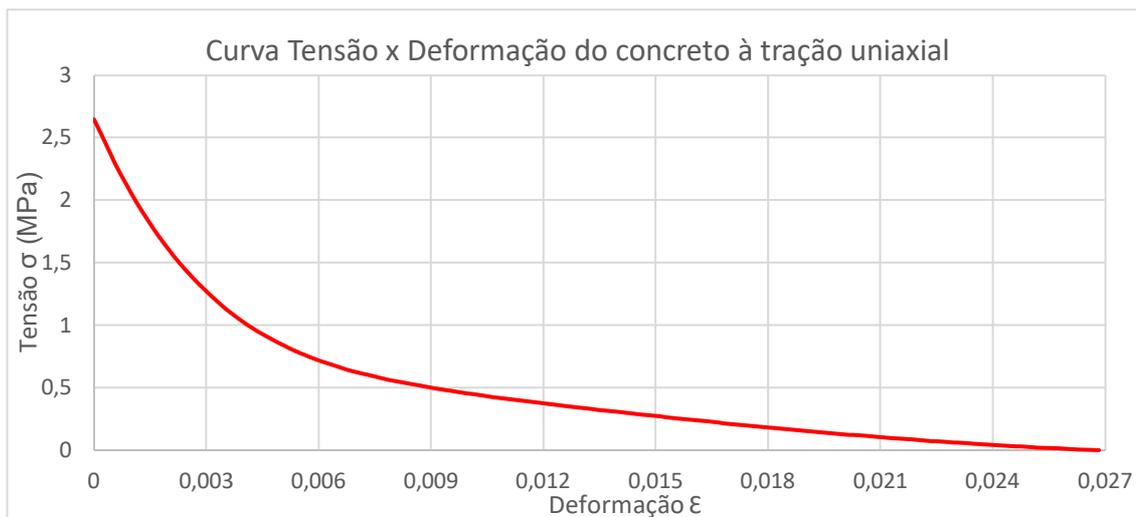
Fonte: Lima (2018)

$$\epsilon_t = \epsilon_{tm} + \frac{W}{l_{eq}} \quad (17)$$

ϵ_{tm} é a deformação correspondente à resistência à tração média f_{tm} .

O gráfico da Figura 33 apresenta os valores de tensão x deformação que foram inseridos no ABAQUS para descrever esse comportamento do concreto.

Figura 33 - Curva dos valores de tensão x deforma do concreto à tração uniaxial



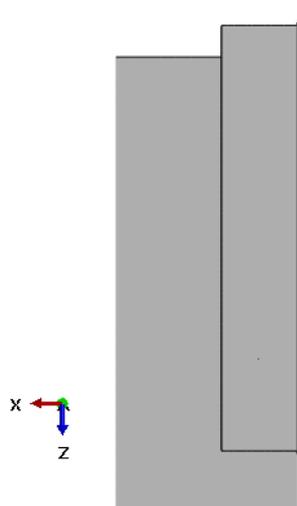
Fonte: Autoria própria

6.3 Montagem do modelo

Após a criação da geometria dos elementos e a definição das propriedades dos materiais constituintes, é feita a montagem do ensaio posicionando as partes já citadas em suas posições de forma que no fim é obtido $\frac{1}{4}$ da seção de um ensaio *push-out*. Tendo assim $\frac{1}{4}$ do perfil metálico, metade da laje de concreto com a armadura devidamente embutida nela e dois conectores de cisalhamento localizados no meio da mesa da quarta parte do perfil.

Nessa modelagem a orientação do modelo acontece de forma que o eixo Z aponta para baixo, logo representa o comprimento do modelo, o Y diz respeito a direção da altura da laje e X é a direção da largura da laje e da mesa, como pode observar na Figura 34.

Figura 34 - Orientação do ensaio Push-out



Fonte: Autoria própria

6.4 Análise numérica

Para a análise do modelo foi adotado o método *dynamic explicit*. Apesar de ser um método para análises de modelos dinâmicos, pode ser adotado para modelos estáticos, tendo em vista que a aplicação de carga deve ser de maneira lenta, para simular uma aplicação estática. O modelo dinâmico explícito se mostrou eficiente nos estudos que envolvem a análise do dano do material, grandes deformações, não linearidade das interações e materiais. Vários pesquisadores já fizeram uso desse método para a análise de ensaio *push-out* com resultados satisfatórios, como Lima (2018), Bezerra (2018), Kim (2017), Nguyen e Kim (2009).

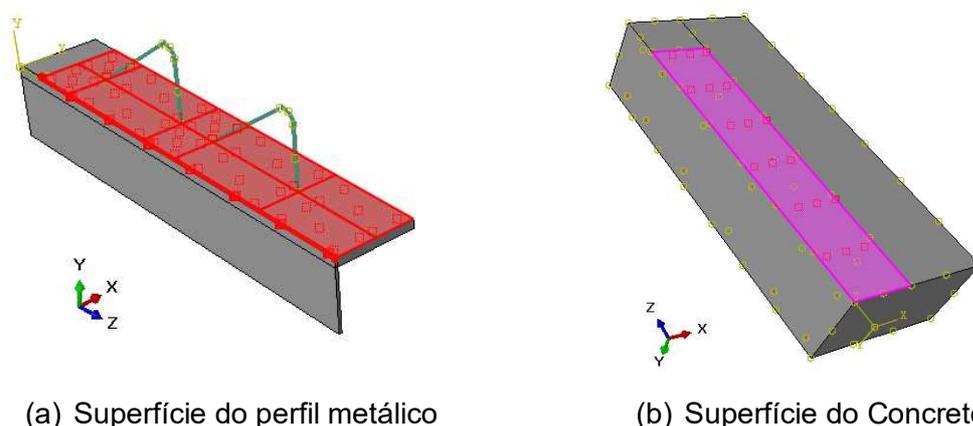
6.5 Interação entre as partes

Para que seja seguido as condições do ensaio *push-out* devem ser adotadas interações entre os elementos, de forma a representar o mais fiel possível o comportamento do ensaio experimental. Nessa seção estão listadas as interações usadas e suas justificativas.

6.5.1 Interação laje - mesa do perfil

Na superfície de contato entre a laje de concreto e a mesa do perfil metálico no ensaio *push-out*, é comumente aplicada uma substância lubrificante nessa superfície com a finalidade de reduzir o atrito entre essas duas peças, proporcionando assim uma transferência de esforços mais direta para os conectores. Para que esse comportamento fosse replicado na modelagem foram utilizadas as propriedades de interação *tangential behavior* e *normal behavior*, a primeira para que se evite o atrito e a segunda para evitar a penetração nas superfícies. A Figura 35 destaca as superfícies que irão sofrer essas interações de contato.

Figura 35 - Superfícies que foram aplicadas as propriedades de contato *tangential behavior* e *normal behavior*



(a) Superfície do perfil metálico

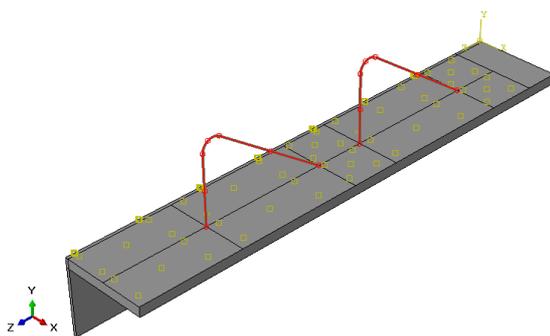
(b) Superfície do Concreto

Fonte: Autoria própria

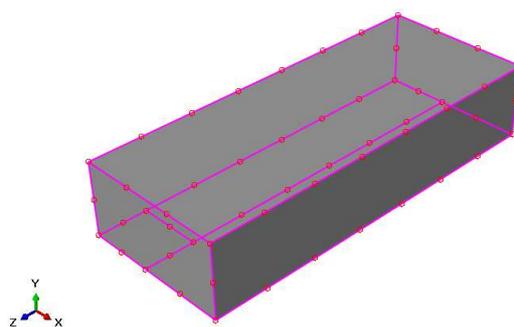
6.5.2 Interação laje - conectores de cisalhamento

Como os conectores encontram-se embutidos na laje de concreto, foi utilizado a restrição *embedded*. Esse tipo de restrição garante o trabalho conjunto dos conectores de aço e o concreto desprezando o deslizamento entre eles. Para determinar essa interação é preciso definir uma *embedded region* e uma *host region*, que respectivamente correspondem a região que vai ficar embutida e a região que na qual se vai embutir o elemento. Isso pode ser ilustrado na Figura 36 .

Figura 36 - Elementos envolvidos na restrição *embedded* entre laje e conector



(a) Região embutida



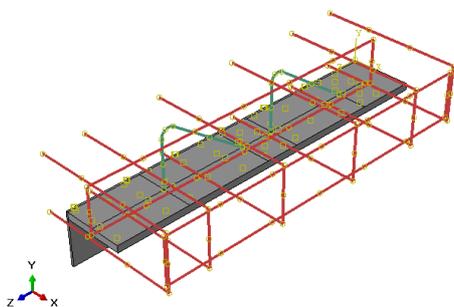
(b) Região em que os conectores são embutidos

Fonte: Autoria própria

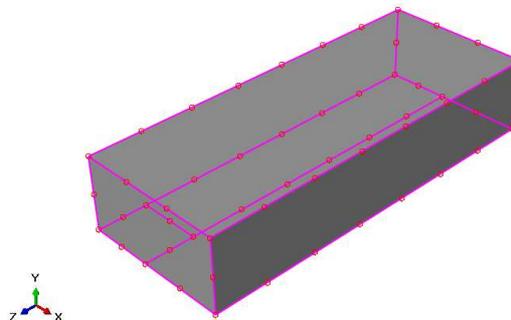
6.5.3 Interação laje - armadura da laje

Por essas mesmas justificativas foi utilizado aqui a mesma interação do tópico anterior. A Figura 37 apresenta os elementos envolvidos nesta interação, onde a armadura da laje encontra-se embutida na mesma.

Figura 37 - Elementos envolvidos na restrição *embedded* entre laje e armadura da laje



Região embutida



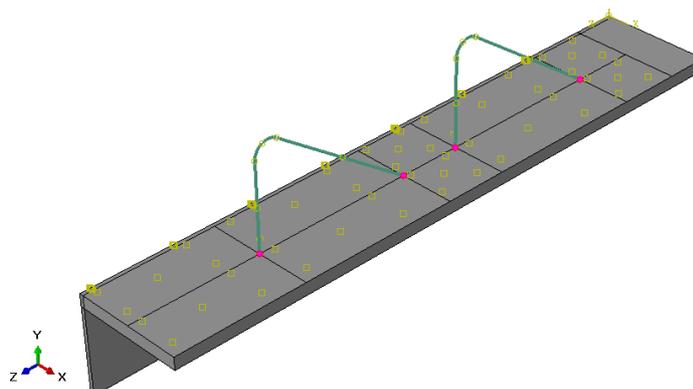
Região em que as armaduras são embutidas

Fonte: Autoria própria

6.5.4 Interação conector de cisalhamento - mesa do perfil

No ensaio experimental de *push-out* o conector de cisalhamento é preso por uma solda de filete que deve ser dimensionada a resistir esforços superiores a tensão de escoamento do conector já que o ensaio tem o objetivo principal de estudar o comportamento do conector em situação de cisalhamento e não a resistência da solda. Para que esse comportamento seja atingido, a interação do tipo *tie* foi aplicada entre às hastes dos conectores e a mesa do perfil metálico (Figura 38). Esse tipo de interação unifica os deslocamentos do modelo e elimina os deslizamentos entre essas superfícies.

Figura 38 - Conexão do tipo *tie* aplicada no conector e o perfil

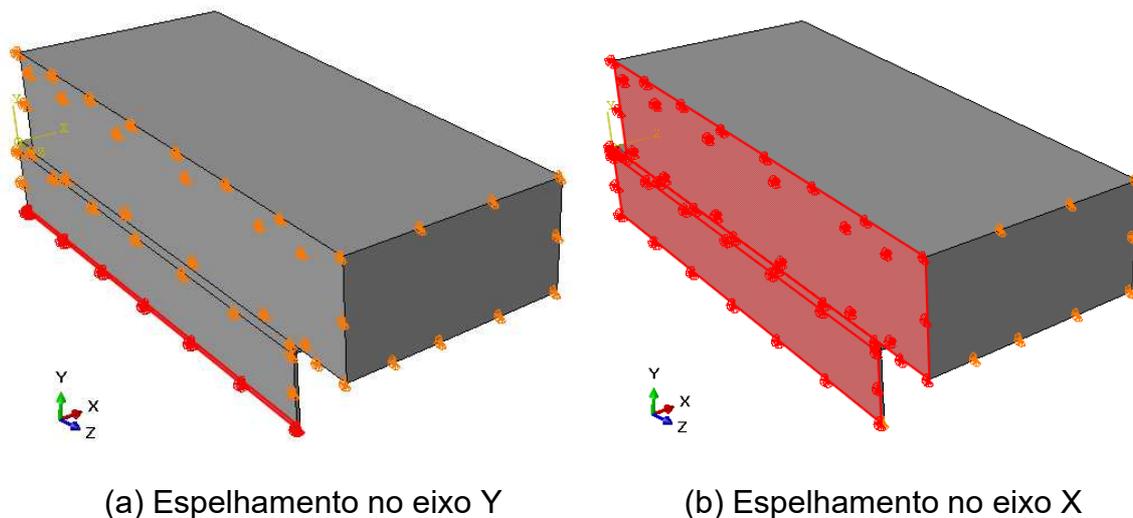


Fonte: Autoria própria

6.6 Condições de contorno

Foi necessário a aplicação de condições de contorno devido a simetria da modelagem. Na Figura 39 as superfícies em vermelho marcam onde o modelo foi dividido e adicionadas restrições de deslocamento a fim de garantir a estabilidade do experimento.

Figura 39 - Superfícies onde foram aplicadas condições de contorno



(a) Espelhamento no eixo Y

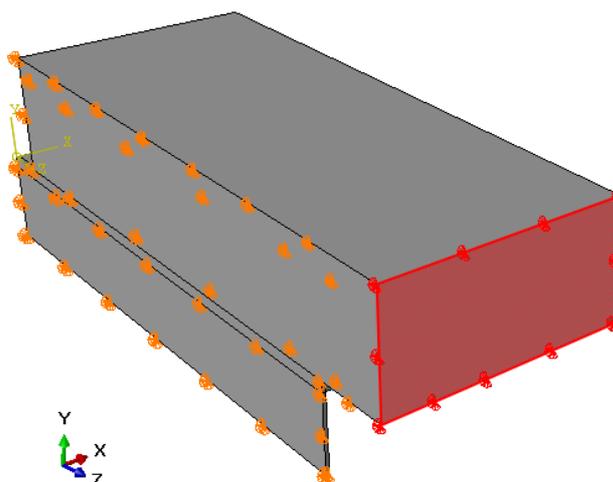
(b) Espelhamento no eixo X

Fonte: Autoria própria

Na Figura 39a o corte acontece no meio da alma de forma transversal, nessa superfície a restrição de deslocamento acontece no eixo Y. Já na Figura 39b, o corte acontece no sentido longitudinal da alma, perpendicular a mesa, cortando assim a laje exatamente ao meio. nessa superfície o deslocamento é restrito no eixo X.

Além disso, o próprio ensaio *push-out* estabelece uma condição de contorno, que é o apoio da laje na face oposta ao carregamento. Nessa face, marcada de vermelho na Figura 40, foi restrito seu deslocamento na direção Z.

Figura 40 - Restrição devido ao apoio do ensaio



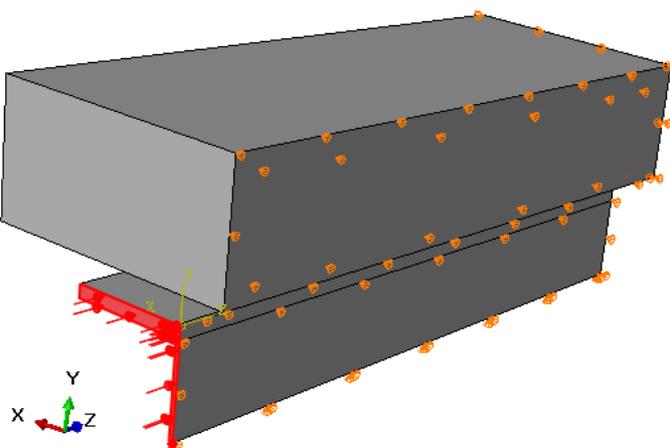
Fonte: Autoria própria

6.7 Carregamento

A carga foi aplicada na face da seção do perfil metálico oposta à face do concreto que se apoia, onde acontece a restrição de deslocamento no eixo Z (Figura 41).

O carregamento foi aplicado na forma de tensão em uma área que representa $\frac{1}{4}$ da seção transversal do perfil.

Figura 41 - Carregamento do modelo



Fonte: Autoria própria

6.8 Definição da malha das partes

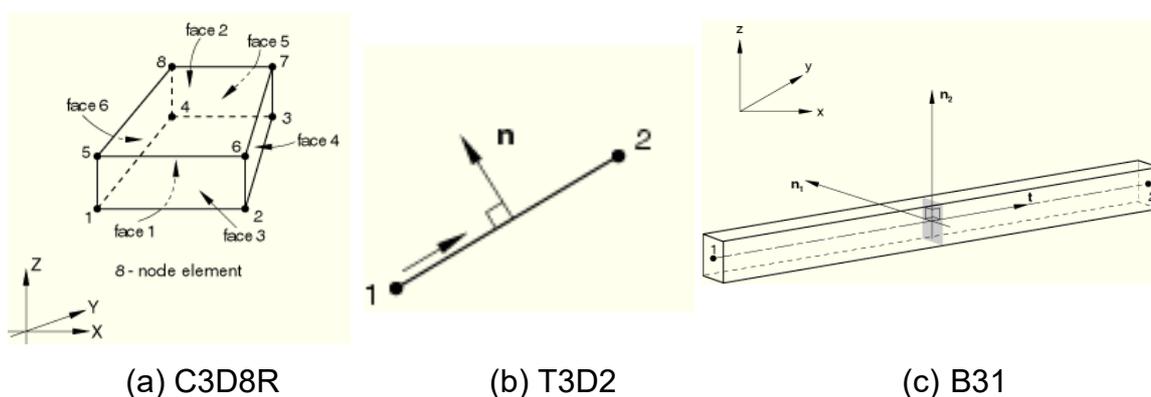
Os elementos finitos que foram usados nesta modelagem foram o C3D8R, T3D2 e B31, esses elementos estão disponíveis na biblioteca do *Abaqus* (Figura 42).

Na laje e no perfil metálico foram utilizados elementos do tipo sólido C3D8R, onde este elemento finito, possui uma geometria hexaédrica com 8 nós, e cada nó com 3 graus de liberdade. Em relação ao tamanho de cada elemento, para a laje foi utilizado malha de 25 mm e para o perfil 10 mm.

Para a armadura da laje foi utilizado os elementos do tipo T3D2, que consiste em um elemento de treliça com 2 nós em que cada nó existe 3 graus de liberdade.

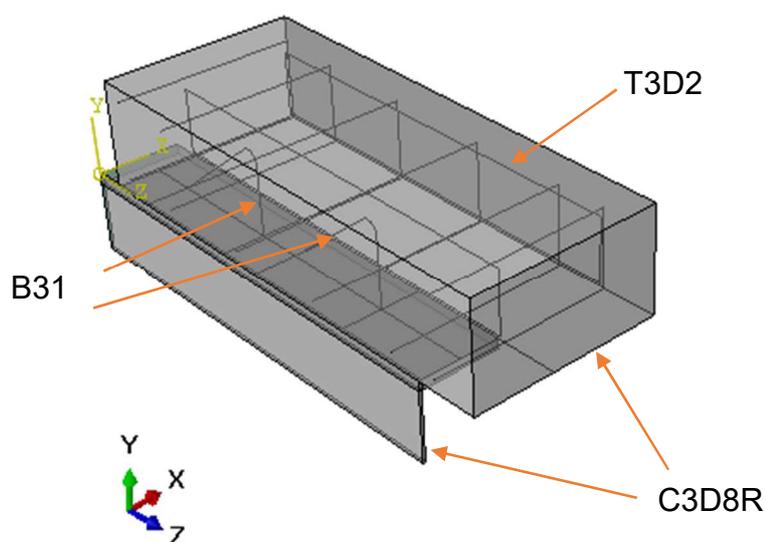
No caso do conector treliçado o elemento B31 foi o mais adequado, onde trata de um elemento de viga com 2 nós, um em cada extremidade do elemento e cada nó com 6 graus de liberdade relativos a translação e a rotação em cada eixo. A Figura 43 apresenta onde cada elemento foi utilizado na modelagem.

Figura 42 - Elementos utilizados na modelagem



Fonte: *ABAQUS Analysis User's Manual*

Figura 43 - Elementos aplicados na modelagem



Fonte: Autoria própria

7 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para que se possa fazer a análise dos parâmetros do conector em questão por meio do modelo numérico elaborado até aqui, é necessário que a modelagem seja validada. A validação do modelo tem a finalidade de garantir que o ensaio que foi elaborado numericamente apresente resultados similares ao mesmo realizado de forma experimental.

Para a validação, foram comparados os valores da capacidade resistente, as curvas de carga x deslizamento e o modos de falha obtido numericamente nesse trabalho com os que foram obtidos experimentalmente por Barbosa (2016) para o conector treliçado reto com diâmetro de 12,5 mm.

Além disso, os resultados obtidos foram comparados com a modelagem de Lima *et al.* (2022), que utilizou elementos tridimensionais para a modelagem do conector treliçado reto.

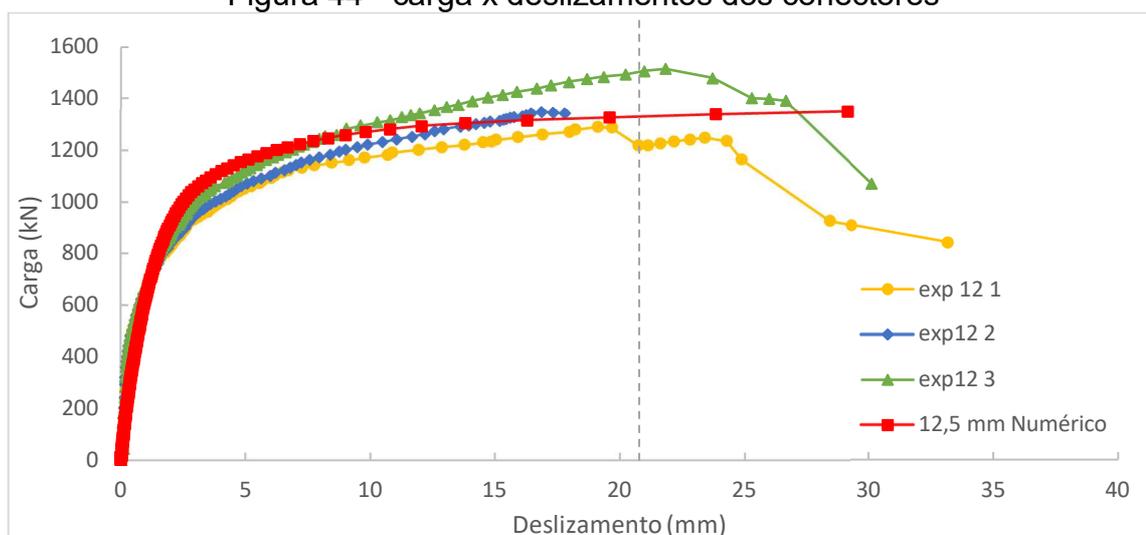
7.1 Curva carga x deslizamento

Na Figura 44 é possível observar a curva carga x deslizamentos dos conectores experimentais e do conector modelado numericamente. É possível constatar que a curva que representa o modelo numérico apresenta uma boa

concordância quando comparadas com curvas experimentais, principalmente no trecho em que seu comportamento é elástico.

Como utilizou-se controle de carga na simulação não é possível obter o decaimento da curva carga versus deslizamento numérica. Contudo, como o objetivo da simulação é a obtenção da capacidade resistente do modelo, a metodologia adotada é satisfatória.

Figura 44 - carga x deslocamentos dos conectores



Fonte: Autoria própria

7.2 Capacidade resistente

Para a obtenção da sua capacidade resistente, foi determinado o deslocamento correspondente ao carregamento máximo alcançado para cada modelo experimental, com esses valores de deslizamento, foi obtido um valor médio como parâmetro de comparação entre os modelos experimentais e numérico. O valor correspondente a média do deslocamento no pico das curvas, foi de 20,88 cm, que está representada na forma de uma linha tracejada na Figura 44.

A Tabela 3 apresenta as cargas últimas dos conectores experimentais (P_{exp}) e a carga última numérica (P_{num}) do conector simulado nessa pesquisa, que teve o valor de 166,32 kN. É possível quantificar a diferença entre os modelos através do coeficiente (P_{exp}/P_{num}).

Tabela 3 - Capacidade resistente do modelo experimental e numérico

Nomenclatura do modelo	P_{exp} (kN)	P_{num} (kN)	(P_{exp}/P_{num})
CR 12,5-1	161,27		0,969
CR 12,5-2	168,40	166,32	1,012
CR 12,5-3	189,35		1,138

Fonte: Autoria própria

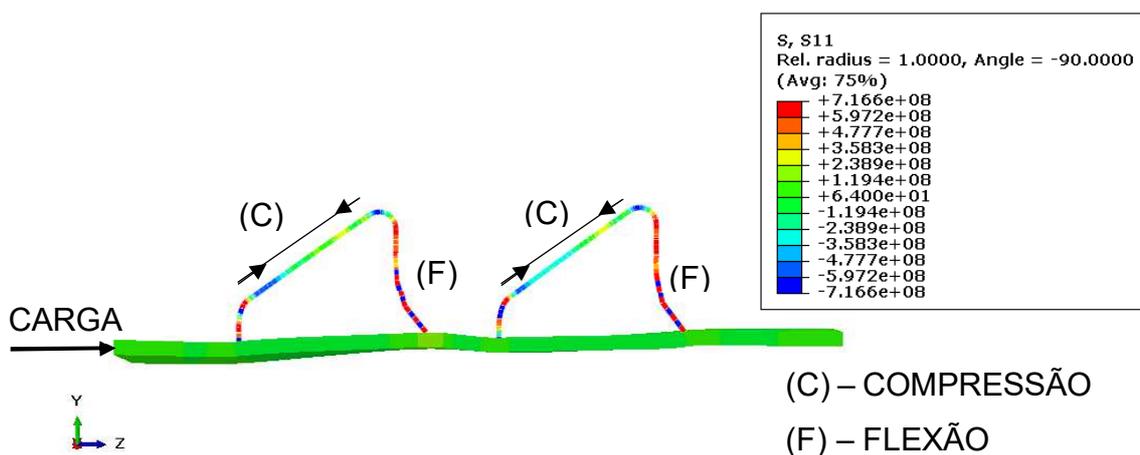
Nesse ponto, observou-se que o ensaio chegou a um carregamento de 1330,57 kN, apresentando uma resistência 5,43% menor que a média da resistência dos ensaios experimentais para o deslizamento de 20,88 cm. A maior diferença entre os ensaios experimentais e o numérico foi de 13,84% e aconteceu para o conector CR 12,5-3. É importante destacar que o resultado do ensaio experimental do conector CR 12,5-3 é aquele que mais se afasta da média dos ensaios experimentais, esse comportamento pode ter acontecido devido a problemas na hora da sua execução. De modo geral a capacidade resistente é próxima as obtidas em ensaios experimentais.

7.3 Modo de ruptura

A Figura 45 apresenta as tensões axiais nos conectores, em que se pode destacar que as hastes do conector trabalham de forma diferente. A haste vertical sofre um esforço de flexão enquanto a haste inclinada está sendo comprimida.

Além disso a deformação do conector que aparece na Figura 45 é similar a deformação que existe no ensaio experimental de Barbosa (2016) (Figura 48), com a haste vertical tendendo a flexionar próximo a base e a haste inclinada tendo um trecho deformado e orientado na vertical.

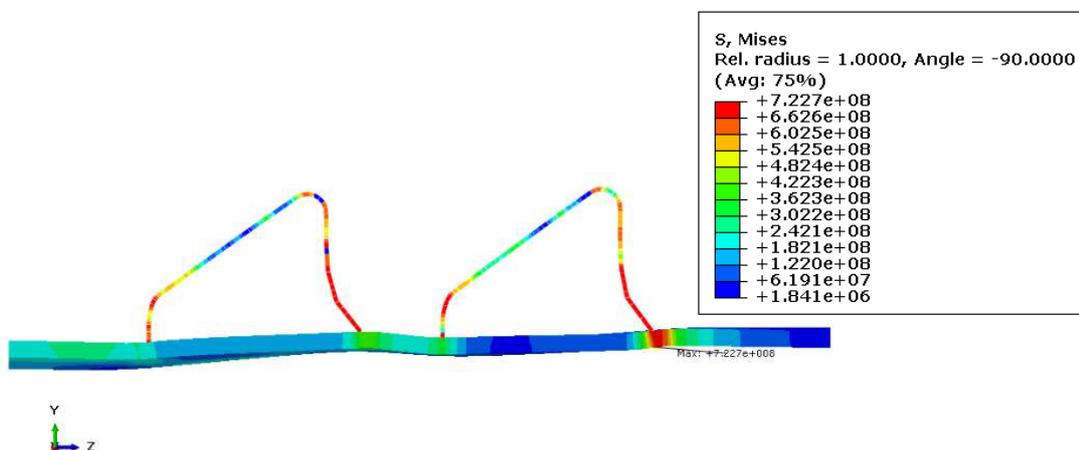
Figura 45 - Distribuições de tensões axiais nos conectores



Fonte: Autoria própria

É possível observar por meio da Figura 46, que diz respeito a uma distribuição de tensão de Von Mises, que na região próxima aos apoios da ligação do conector com a mesa, existe uma concentração de tensão chegando a ultrapassar a tensão de escoamento do aço de 500 MPa, tornando aquela região um ponto crítico para o conector.

Figura 46 - Concentração de tensões de Von Mises no Conector treliçado

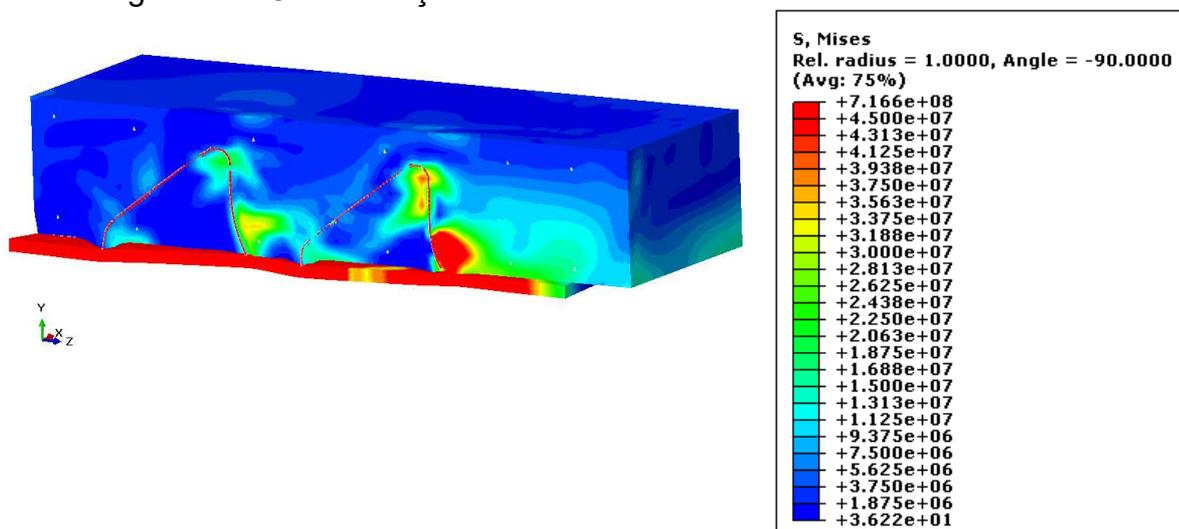


Fonte: Autoria própria

A Figura 47 apresenta a concentração de tensões de Von Mises no concreto. Percebe-se que próximo aos apoios do conector também apresenta uma concentração de tensão no concreto, principalmente nas proximidades da haste vertical. As tensões existentes superam o valor de 30 MPa resultando no esmagamento do concreto naquela região. Quando comparado com a Figura 48, fica claro que durante o ensaio experimental na proximidade da fixação do conector, também existiu essa concentração de tensão, que resultou no esmagamento do concreto naquela região.

Assim, após comparar os resultados experimentais com os obtidos numericamente da curva de tensão x deslizamento, a capacidade resistente e o modo de ruptura, é possível afirmar que o modelo numérico desenvolvido foi capaz de representar com fidelidade o ensaio *push-out* desenvolvido por Barbosa e conseqüentemente o comportamento do conector treliçado reto.

Figura 47 - Concentração de tensões de Von Mises no concreto



Fonte: Autoria própria

Figura 48 - Deformação do conector ensaiado por Barbosa (2016)

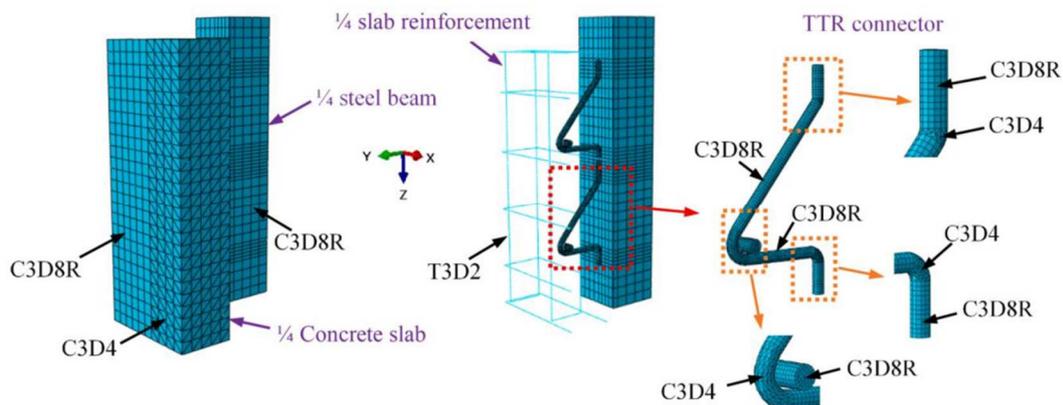


Fonte: Barbosa (2016)

7.4 Comparação do modelo com outras literaturas

Lima *et al.* (2022) elaboraram uma pesquisa para estudar também o conector treliçado reto, onde foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional no ABAQUS. A malha dos elementos que constituem a simulação é apresentada na Figura 49, para o perfil metálico é utilizado o elemento do tipo C3D8R, na armadura da laje foi utilizado elementos do tipo T3D2, por fim, tanto para o conector e para a laje de concreto são utilizados o C3D8R e o C3D4. Diferentemente deste trabalho, Lima *et al.* (2022) optou por usar elementos tridimensionais para modelar o conector de cisalhamento.

Figura 49 - Malha para o modelo numérico de Lima *et al.* (2022)



Fonte: Lima *et al.* (2022)

O conector modelado por Lima *et al.* (2022) que tem como característica uma malha de elementos mais elaborada e obteve uma resistência de 168,01 kN.

Quando comparamos o resultado desses autores com o obtido pela modelagem nesse trabalho, temos que o conector de Lima *et al.* (2022) apresenta uma resistência muito próxima, apenas 1,01% maior. A Tabela 4 apresenta de forma resumida esses dados em que Q_{TTR} refere-se à capacidade resistente de Lima *et al.* (2022), enquanto Q_{num} diz respeito ao resultado da capacidade do conector desenvolvido nesse trabalho.

Tabela 4 - Capacidade resistente do modelo simulado e numérico de Lima *et al.* (2022)

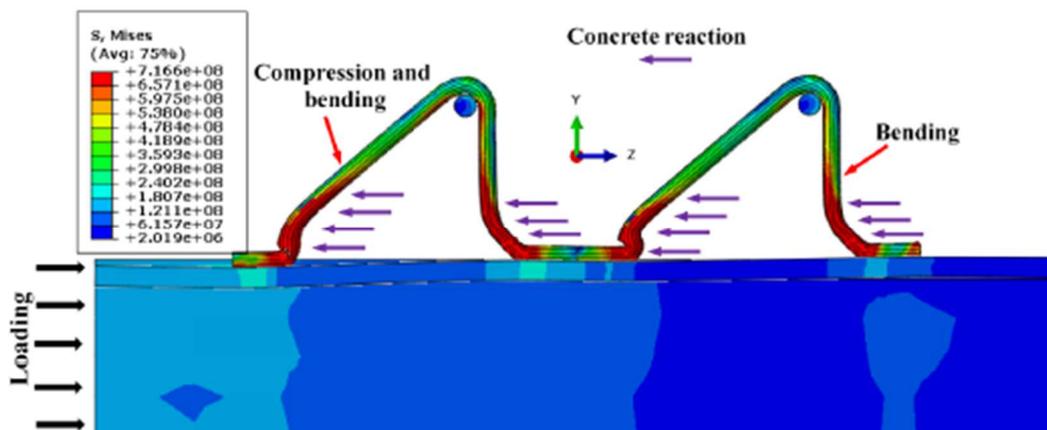
	Q_{TTR}	Q_{num}	(Q_{TTR}/Q_{num})
Capacidade resistente (kN)	168,01	166,32	1,010

Fonte: Lima *et al.* (2022)

A deformação do conector também se assemelha ao resultado obtido por Lima *et al.* (2022), apresentando o mesmo padrão de deformação, com a haste vertical flexionando e a haste inclinada tendendo a se verticalizar, conforme a Figura 50.

Assim, quando a modelagem é comparada com a de Lima *et al.* (2022), é possível perceber que mesmo o conector sendo modelado com um elemento linear enquanto os autores fizeram uso de elementos tridimensionais, os resultados apresentaram alto grau de coerência. Vale destacar que com essa simplificação adotada, resultou em um modelo com processamento mais ágil.

Figura 50 - Distribuição de tensão de Von Mises no conector de Lima *et al.*, (2022)

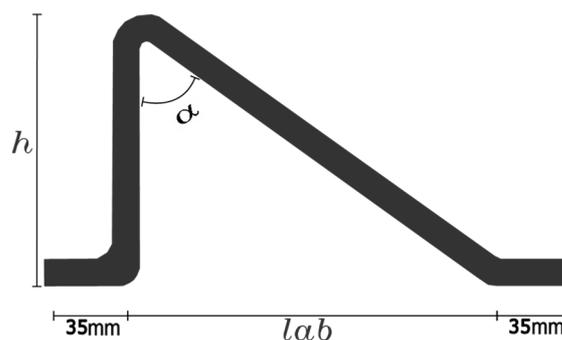


Fonte: Lima *et al.* (2022)

8 ESTUDO PARAMÉTRICO

Nessa seção foi estudado a variação das dimensões do Conector Trelçado Reto (CTR) de forma que foi analisado a influência da sua altura na capacidade resistente do conector. A geometria do conector é definida por uma altura (h), ângulo de abertura entre as hastes (α), distância entre as hastes (lab) e pernas horizontais, que serão usadas para unificar o conector ao perfil metálico por meio de soldas, com um valor fixo de 35 mm. Esses parâmetros estão descritos na Figura 51.

Figura 51 - Parâmetros geométricos do CTR



Fonte: Autoria própria

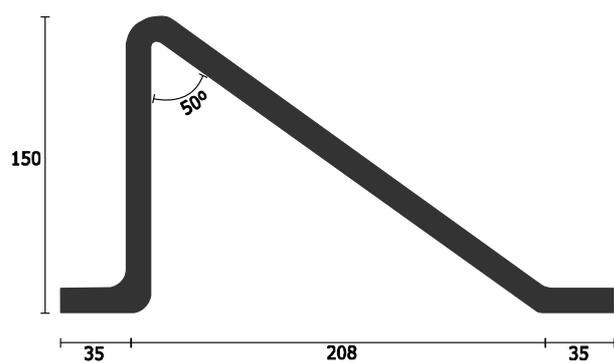
Barbosa (2016) em seu programa experimental ensaiou conectores com dimensões de $h = 130 \text{ mm}$, $\alpha = 50^\circ$ e $lab = 180 \text{ mm}$. Entretanto, na sua pesquisa o autor analisou somente a influência do diâmetro dos conectores na sua capacidade resistente e não a influência dos parâmetros geométricos listados.

A influência da altura do conector na sua resistência foi estudada nesse trabalho com o conector de diâmetro 12,5 mm com alturas de 150 mm, 130 mm, 110 mm e 90 mm. Com a finalidade de que se fosse mantida a curvatura no topo do conector e o ângulo de abertura entre as hastes, foi mantido constante a relação $h/lab = 0,72$. Essas alturas foram usadas por Lima (2018) para a análise da resistência do conector de cisalhamento isósceles. A Figura 52 ilustra as diferentes dimensões dos conectores a serem analisados e suas respectivas nomenclaturas.

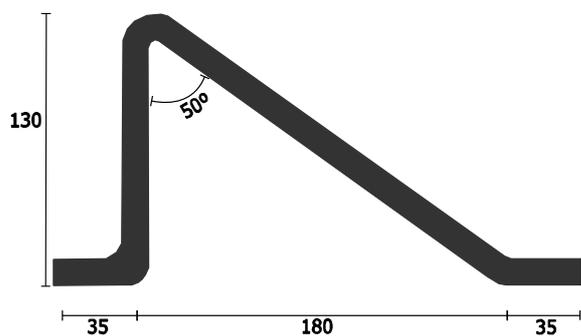
Para o CTR-12,5-H150 foi necessário aumentar a altura da laje de concreto que nesse ensaio foi de 175 mm para que assim fosse respeitado o cobrimento mínimo.

Figura 52 - Dimensões dos conectores estudados em mm

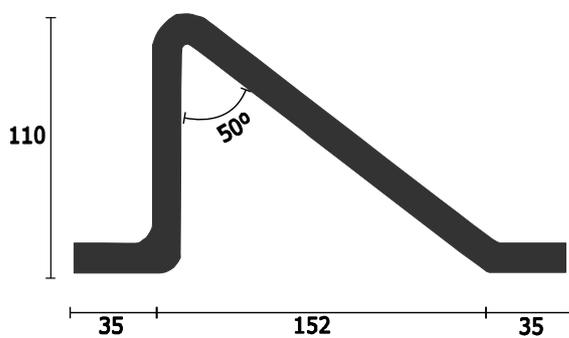
Conector Treliçado Reto (CTR)	Nomenclatura
-------------------------------	--------------



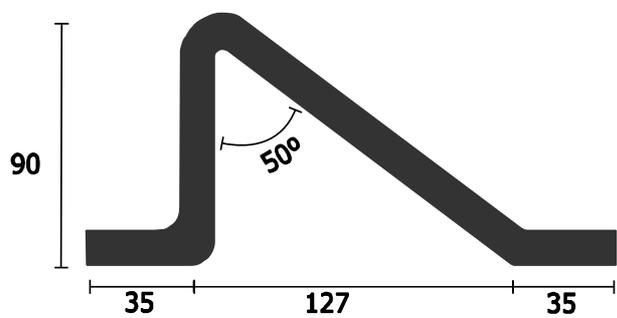
CTR-12,5-H150



CTR-12,5-H130



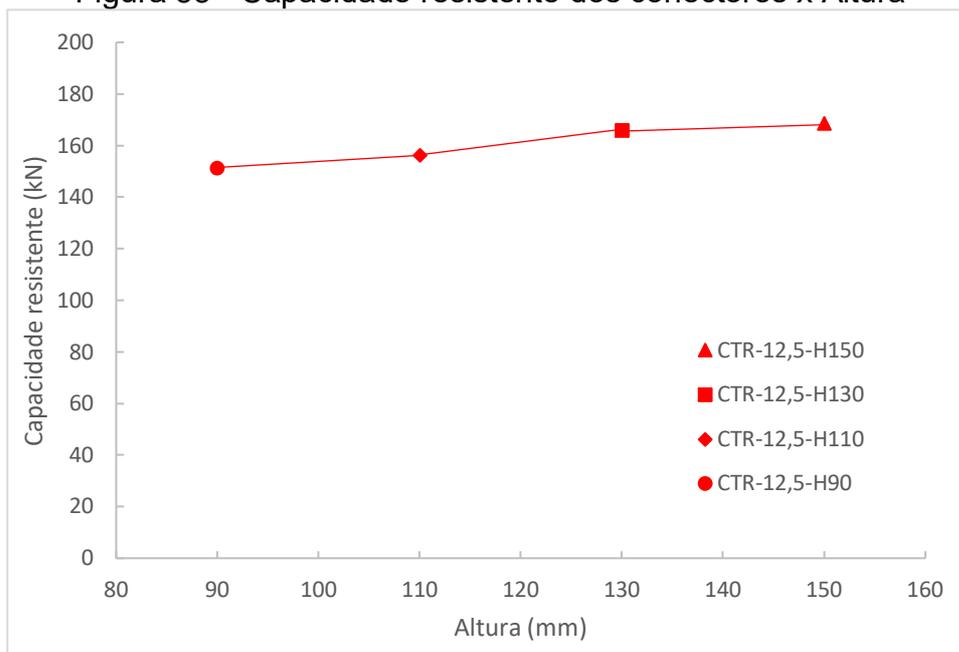
CTR-12,5-H110



CTR-12,5-H90

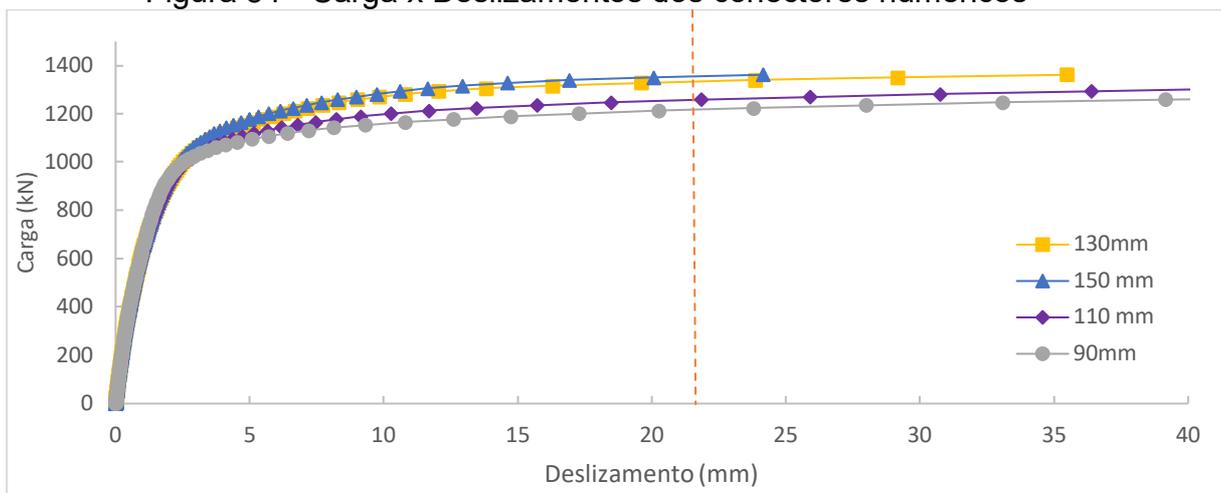
Com a Figura 53 é possível perceber que a capacidade resistente dos conectores cresce de acordo com a altura do conector. A Figura 54 exhibe as curvas de carregamento x deslizamentos para esses mesmos conectores, nela fica claro que os modelos se comportam de forma similar em seu regime elástico, e a partir de um certo ponto, os conectores estabelecem patamares de escoamento diferente para cada altura.

Figura 53 - Capacidade resistente dos conectores x Altura



Fonte: Autoria própria

Figura 54 - Carga x Deslizamentos dos conectores numéricos



Fonte: Autoria própria

Para a determinação dos valores de resistência dos modelos numéricos utilizou o valor da média do deslocamento no pico das curvas dos ensaios experimentais, equivalente a 20,88 cm. Os valores de capacidade resistente obtidos para as alturas de conector simulados estão apresentados na Tabela 5. O CTR-12,5-H150 foi o conector mais resistente, sua capacidade resistente foi de 168,71 kN, sendo 1,64% maior que a do conector de 130 mm. O CTR-12,5-H90 teve o menor valor de resistência, com um valor de 151,42 kN, 8,78% menor que a do CTR-12,5-H130. Embora a resistência para o conector de menor altura seja menor, para cargas menores ela apresenta uma boa capacidade, logo torna-se viável a utilização desse conector em estrutura de médio e pequeno porte, onde as solicitações não sejam excessivas.

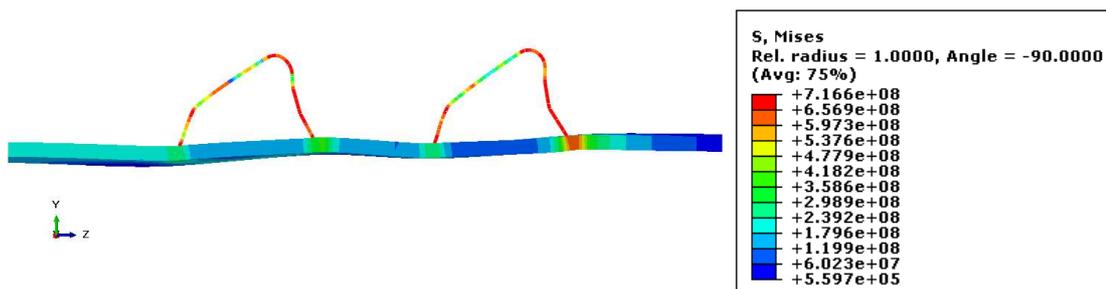
Tabela 5 - Capacidade resistente dos conectores com variação de altura

Nomenclatura do modelo	Carga última (kN)	(P_{ult}/P_{H130})
CTR-12,5-H90	151,42	0,912
CTR-12,5-H110	156,43	0,942
CTR-12,5-H130	166,32	1,000
CTR-12,5-H150	168,71	1,016

Fonte: Autoria própria

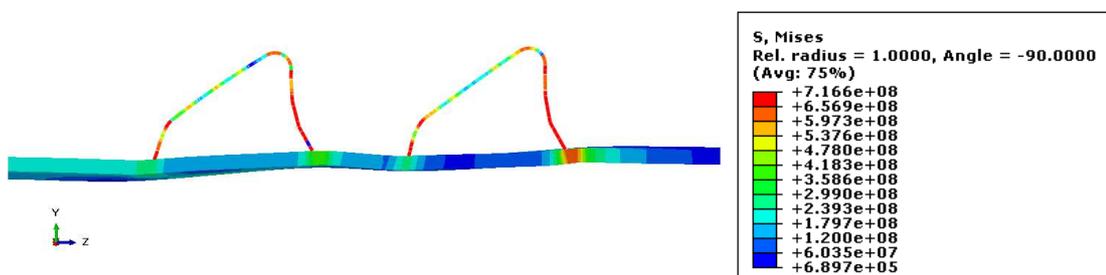
O modo de falha dos modelos ensaiados foi similar ao do conector validado, existe uma concentração de tensões nas hastes próximo a sua ligação com a mesa do perfil metálico, a haste na diagonal do conector apresenta predominantemente esforços de compressão enquanto na haste vertical existe a tendência de sofrer uma flexão, na Figura 55, Figura 56 e Figura 57 é possível observar a distribuição de tensões de Von Mises nos conectores. Combinado a isso, o concreto próximo a ligação do conector com o perfil apresentou falhas levando a seu esmagamento principalmente junto a haste vertical, onde foi apresentado o pico de tensão em todos os modelos ensaiados. Podemos ver a distribuição de tensões de Von Mises para a laje de concreto dos ensaios na Figura 58, Figura 59 e Figura 60.

Figura 55 - Distribuição de tensões no CTR-12,5-H90



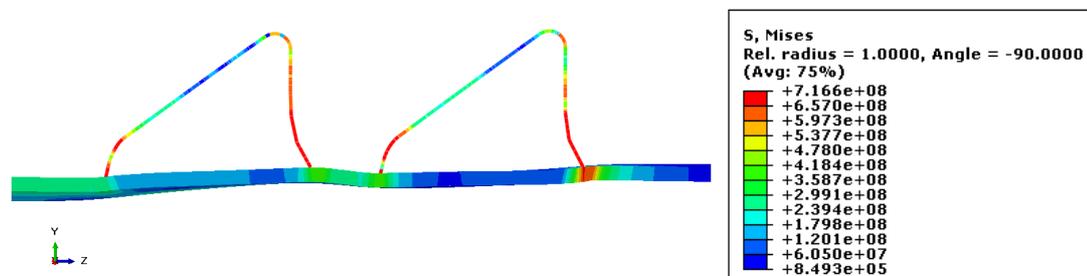
Fonte: Autoria própria

Figura 56 - Distribuição de tensões no CTR-12,5-H110



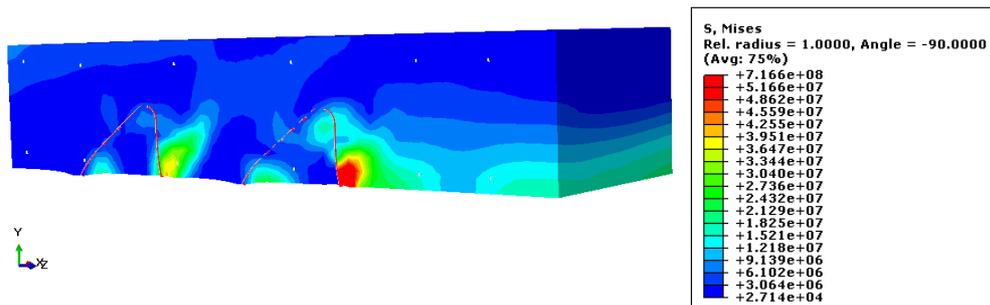
Fonte: Autoria própria

Figura 57 - Distribuição de tensões no CTR-12,5-H150



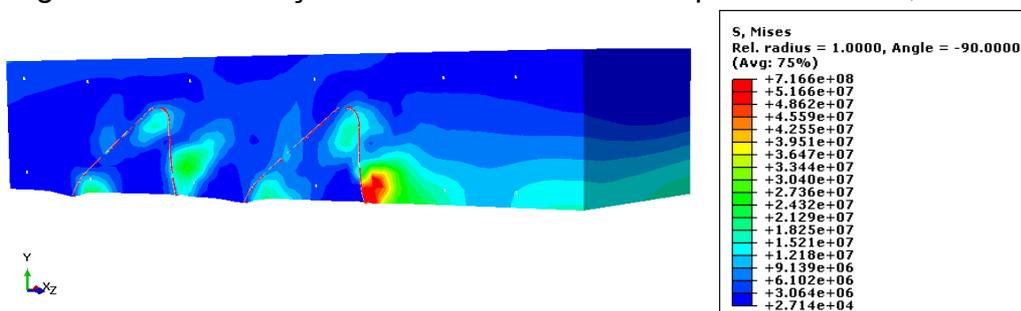
Fonte: Autoria própria

Figura 58 - Distribuição de tensões no concreto para o CTR-12,5-H90



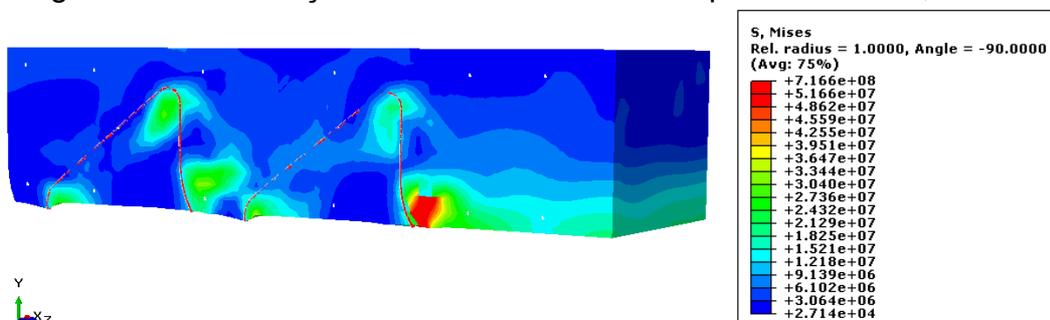
Fonte: Autoria própria

Figura 59 - Distribuição de tensões no concreto para o CTR-12,5-H110



Fonte: Autoria própria

Figura 60 - Distribuição de tensões no concreto para o CTR-12,5-H150



Fonte: Autoria própria

8.1 Comparação entre o conector treliçado retangular e isósceles

Nesta seção foi feita uma comparação do resultado da capacidade resistente para a variação de altura entre o conector treliçado reto, modelado nesse trabalho, e o conector treliçado isósceles que foi modelado em elementos finitos por Lima (2018). Foram analisadas as resistências dos conectores para as alturas de 90, 110, 130 e 150 mm. Os resultados obtidos na modelagem de Lima

(2018) são apresentados e comparados com os obtidos nessa pesquisa na Tabela 6.

De modo geral, o conector treliçado reto apresentou um resultado de resistência equivalente a 85% do conector isósceles, isso devido a este último ter uma geometria que consegue fazer melhor uso da resistência do aço, já que no conector isósceles pelo menos uma das hastes encontra-se tracionada, enquanto no conector treliçado reto esse comportamento não acontece, uma das pernas do conector sofre compressão enquanto a outra sofre esforços de flexão.

Tabela 6 - Capacidade resistente do conector treliçado reto e isósceles para diferentes alturas

Altura dos modelos (mm)	Q_{reto} (kN)	$Q_{\text{isósceles}}$ (kN)	$Q_{\text{reto}}/Q_{\text{isósceles}}$
90	151,42	181,75	0,833
110	156,43	189,02	0,827
130	166,32	189,61	0,877
150	168,71	194,87	0,865

Fonte: Lima (2018)

A Figura 61 apresenta os resultados para as diferentes alturas da capacidade resistente para os dois tipos de conectores, juntamente com uma linha de tendência para cada conjunto de resultados. É importante destacar que ambos os conectores tendem a ter sua resistência aumentada mediante o aumento da sua altura, uma linha de tendência, obtida por meio de uma regressão linear, tem sua forma descrita pela Equação (18) e foi traçado na figura para que se possa compreender como acontece esse crescimento.

$$y = ax + b \quad (18)$$

y - Variável independente (capacidade resistente do conector)

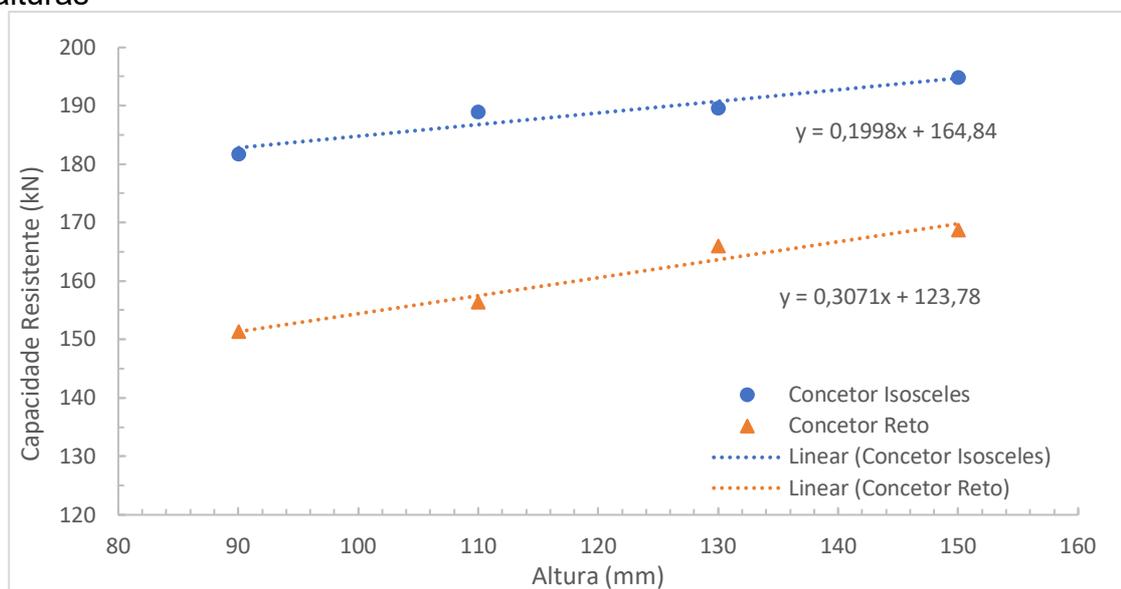
x - Variável dependente (altura do conector)

a - Coeficiente angular

b – Coeficiente linear

Para o conector isósceles o seu coeficiente angular foi de 0,1998, enquanto isso, para o conector reto foi 0,3071. Embora o conector reto, apresente resultados de resistência inferiores aos do conector isósceles, a linha de tendencia dos resultados para o conector de ângulo reto tem um coeficiente angular 35% maior que o do conector isósceles. Desta forma, para o mesmo acréscimo de altura do conector o de ângulo reto proporcionará um maior acréscimo de resistência quando comparado com o Isósceles.

Figura 61 - Capacidade resistente dos conectores isósceles e reto para diferentes alturas



Fonte: Autoria própria

9 CONCLUSÃO

9.1 Conclusão sobre a modelagem do conector

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional e não linear em elementos finitos com a finalidade de estudar o comportamento do conector treliçado reto em um ensaio *Push-out*. No modelo foram considerados a não-linearidade dos materiais e o Modelo de Dano Plástico para descrever com mais fidelidade o comportamento do concreto. O método de análise foi feito pelo

método *Dinamic Explicit*. A junção desses parâmetros conseguiu simular de forma satisfatória o modelo do ensaio *Push-out* proposto.

A partir do gráfico que apresenta as curvas de carga x deslocamentos foi possível constatar que o conector numérico apresentou uma boa concordância com as curvas experimentais.

Em relação a sua capacidade resistente, o conector obteve um resultado que difere em 5,43% do resultado da média dos conectores experimentais e 13,84% de diferença entre o conector modelado numericamente e o maior resultado obtido experimentalmente. A ruptura do modelo numérico acontece de maneira análoga ao ensaio experimental, com uma concentração de tensão próxima a ligação do conector com a mesa do perfil metálico conjuntamente com o esmagamento do concreto também nessa região.

Estes resultados puderam ser validados de acordo com os ensaios experimentais executados por Barbosa (2016), além de terem sido comparados com uma modelagem mais elaborada proposta por Lima *et al.* (2022), onde o conector é composto de elementos sólidos, enquanto nesse trabalho o conector foi concebido por elementos lineares. Por fim, a relação entre as capacidades resistentes foi de apenas 1,01%. Com esses resultados, acredita-se que o modelo numérico elaborado neste estudo representa bem o comportamento real do conector.

9.2 Conclusão sobre a análise paramétrica

Foi analisado a influência da variação da altura do conector em relação a sua capacidade resistente, foi possível observar que com o aumento da altura do conector existe um acréscimo na sua resistência. Entretanto, não foi obtido valores significativamente distantes do valor da resistência do conector padrão de 130 mm de altura. O resultado mais distante obtido foi para o conector com 90 mm de altura em que sua resistência foi de 8,78% menor quando comparado com o conector padrão.

A distribuição de tensão nos conectores foi similar em todos os modelos, onde a região de contato do conector com a mesa do perfil metálico apresenta uma alta concentração de tensão. Essas tensões juntamente com o

concreto que acaba sendo esmagado, são os responsáveis pelo rompimento do modelo.

Quando comparado com a variação da altura do conector isósceles o conector treliçado reto tende a ter um maior aumento da sua resistência para um certo acréscimo de altura, de modo geral o conector reto tem uma maior tendência de acréscimo de resistência em resposta a um certo crescimento em sua altura.

Desta forma, essa pesquisa observou que para o conector reto o ponto crítico de sua utilização se localiza na região de contato do conector com perfil de aço, que o acréscimo na altura do conector resulta em uma baixa relação com o ganho de resistência, além do que, conectores maiores necessitam de uma laje de maior espessura para a sua acomodação, situação muitas vezes indesejada. Por outro lado, a diminuição da altura, embora resulte em uma redução na capacidade resistente, ainda apresenta uma resistência compatível com estruturas de médio e pequeno porte, além de favorecer a aplicabilidade de lajes de menor altura em estruturas mistas. Assim, o conector treliçado reto pôde ser estudado com a finalidade de que seja difundida a sua aplicação, para que com esse estudo cresça a possibilidade da utilização desse conector além da expansão da utilização das estruturas mista.

REFERÊNCIAS

ABAQUS, *User's Manual*, Version 6.14-4, Dessault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2008). ABNT NBR 8800. *Projeto e execução de estruturas de aço e de mistas aço e concreto de edifícios*.

BARBOSA, W. C. S. (2016). *Estudo de Conectores de Cisalhamento em Barras de Aço para Vigas Mistas de Aço-Concreto*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 008A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 511p.

BARBOSA, W. C. S. et al. *Avaliação experimental sobre o comportamento estrutural de conectores de cisalhamento treliçados em vigas mistas de aço e concreto*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, p. 1157-1182, 2019.

BEZERRA, LUCIANO M. et al. *Truss-type shear connector for composite steel-concrete beams*. Construction and Building Materials, v. 167, p. 757-767, 2018.

BONILLA, J.; BEZERRA, L. M.; LARRÚA, R.; RE CAREY, C.; MIRAMBELL, E. *Modelación numérica con validación experimental aplicada al estudio del comportamiento de conectores tipo perno de estructuras compuestas de hormigón y acero*. Revista Ingeniería de Construcción, v. 30, n. 1, p. 53–68, 2015.

CARDOSO, HERMANO DE SOUSA. *Avaliação do comportamento de conectores constituídos por chapas de aço com recortes regulares - ênfase em conectores de geometria crestbond aplicados em pilares mistos*. 2018. 319 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CARNEIRO, EMANUEL SILVA. *Estudo numérico de conectores de cisalhamento tipo isósceles para vigas mistas de aço e concreto*. 2022. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022.

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.

CHATER, L. (2015). *Estudo Numérico e Experimental de Conectores de Cisalhamento Feitos de Vergalhão CA-50 para Uso em Estrutura Mista de Aço-Concreto*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-013^a/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 177p.

CHAVES, I. A. (2009). *Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

COSTA, MÁRIO HENRIQUES ARAGÃO *et al.* *Análise de Estruturas de Concreto Armado Considerando Dano e Plasticidade*. In: XIII SIMMEC 2018 - Vitória - ES, 2018. Disponível em: <<https://www.doity.com.br/anais/xiiisimmec2018/trabalho/70562>>. Acesso em: 18/11/2022 às 15:34

DAVID, D. *Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas*. 256p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

DUTRA, C. M. (2014). *Estudo do comportamento estrutural do conector Crestbond considerando variações geométricas e mecânicas*. Dissertação de Mestrado em

Engenharia Civil, Publicação D978e2014, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 157p.

FORTES, WANDO RODRIGUES. *Estudo numérico de conectores de cisalhamento tipo Perfobond*. 2018. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

INTERNATIONAL FEDERATION STRUCTURAL CONCRETE. fib-MC2010 (2012). The International Federation for Structural Concrete, *fib Model Code 2010 Final draft*. Volume 2, April 2012.

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

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

LIMA, JERFSON M. *et al.* *Study of the behavior and resistance of right-angle truss shear connector for composite steel concrete beams*. Engineering Structures, v. 253, p. 113778, 2022.

LIMA, J. M. (2021). *Estudo experimental e numérico do comportamento de vigas mistas aço-concreto com conector treliçado*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 09A/21, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 163p.

MALITE, M.; (1990). *Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios*. São Carlos. 144p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

MOURA, PAULO HENRIQUE ROBERTO. *Análise numérica de vigas mistas de aço e concreto com conector de cisalhamento treliçado*. 2022. 120 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022.

QURESHI, JAWED; LAM, Dennis; YE, Jianqiao. *Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams*. Journal of constructional steel research, v. 67, n. 4, p. 706-719, 2011.

SILVA, ABDIAS JERÔNIMO. *Estudo simulado de conectores de cisalhamento tipo retângulo em vigas mistas de aço e concreto*. 2022. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022.

SILVA, HALLEY PEREIRA DA. *Simulação numérica do comportamento de conectores de cisalhamento tipo crestbond*. 2013. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SOUSA, JOSEANNE ALVES DE. *Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto utilizando conectores de cisalhamento treliçados*. 2019. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2019.

TRISTÃO, GUSTAVO ALVES *et al.* *Modelagem Numérica Do Ensaio Tipo "Push-Out" Utilizando Conectores De Cisalhamento Flexíveis*. Mecânica Computacional, n. 1, p. 1810-1824, 2002.

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.

XUE, DONGYAN et al. *Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge*. Journal of Constructional Steel Research, v. 74, p. 1-7, 2012.