INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA CAPACIDADE RESISTENTE DA LIGAÇÃO AÇO-CONCRETO COM CONECTOR TRELIÇADO

PAULO HENRIQUE ROBERTO MOURA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA CAPACIDADE RESISTENTE DA LIGAÇÃO AÇO-CONCRETO COM CONECTOR TRELIÇADO

PAULO HENRIQUE ROBERTO MOURA

ORIENTADOR: RAMON SALENO YURE RUBIM COSTA SILVA (UnB)
COORIENTADOR: JERFSON MOURA LIMA (UFC)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
BRASÍLIA/DF

ABRIL/2025
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA CAPACIDADE RESISTENTE DA LIGAÇÃO AÇO-CONCRETO COM CONECTOR TRELIÇADO

PAULO HENRIQUE ROBERTO MOURA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO POR:

_____

Prof. Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva, D.Sc (UnB)
(Orientador)

_____

Prof. Jerfson Moura Lima, D.Sc (UFC)
(Coorientador)

_____

Prof. Jorge Douglas Bonilla Rocha, Dr. Ing. (UnB)
(Examinador Interno)

_____

Prof. Alex Sander Clemente de Souza, DSc (UFSCar)
(Examinador Externo)

Brasília – DF, ABRIL/2025

FICHA CATALOGRÁFICA

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus amados pais, José Moreira Moura Neto e Maria Erinalda Roberto que foram meu suporte humano nesse período e essa conquista é nossa. Dedico, *in memoriam*, a Marinete Moura (minha "veinha") que sempre torceu e me apoiou em tudo.

AGRADECIMENTO

À Santíssima Trindade que me concedeu a Graça de realizar àquilo que meu coração sonhou. À Santíssima e sempre Virgem Maria, de quem sou coisa e propriedade, por, com amor materno, me sustentar em tantos momentos durante essa jornada. Ao Castíssimo esposo da Virgem Maria e pai adotivo de Jesus, Nosso Senhor, São José, por ser canal da Divina Providência e me educar na pobreza que é estar nas mãos de Deus.

Aos meus pais, José Moreira Moura Neto e Maria Erinalda Roberto, que nunca cansaram de apostar em mim, me incentivar, de me prover para realizar os meus sonhos e desejos. Eu os amo.

À minha família, que sempre se fizeram presente, me incentivaram, acolheram foram cuidados de Deus, também providência, nunca me permitindo desanimar e desistir, de modo especial a Marinete Moura, minha veinha (*in memoriam*).

À minha família de vocação, Comunidade Católica Shalom, que me acompanharam na oração, na fraternidade e proximidade, sobretudo em terras brasilienses.

À Jorge Freitas (Jorginho) que de pronto me acolheu em sua casa em Brasília. À Rivinny Moura, Samuel Satino e Joana Satino, que me acolheram com muita prontidão e amor, foram um pedaço do meu Ceará e minha família. E sempre me incentivaram. Deus os recompense.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ramon Saleno Yure Rubin Costa Silva, que para além da orientação sempre esteve próximo, garantindo que me sentisse acolhido, confortável e que não mediu esforços para propor meios de melhor viver esse tempo.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Jerfson Moura Lima, conterrâneo, que me acompanha desde a graduação, por todo ensinamento, amor pela docência e pesquisa transmitidos.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Ing. Jorge Douglas Bonilla Rocha e Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza pela dedicação na leitura e valiosas contribuições ao meu trabalho.

À todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil por todo conhecimento transmitido.

Aos meus amigos me ajudaram nas mais diversas formas, me ouvindo, me animando e sobretudo rezando por mim, minha gratidão a todos, Deus os recompense.

Aos meus colegas de UnB, por partilhar de todos os momentos e em especial à Cláudia Ohana Borges Mendes por toda amizade e companheirismo.

Ao Laboratório de Infraestrutura por todo suporte computacional oferecido.

“Porém, o que pra mim era ganho, por causa de Cristo considerei perda. Mais ainda: considero tudo perda em comparação com o superior conhecimento de Cristo Jesus, meu Senhor; por Ele dou tudo como perdido e o considero lixo, contanto que eu ganhe Cristo e esteja unido a Ele...”

Fl 2,7-9a

“Meu filho, não há vitória sem sacrifício”

Marinete Moura

RESUMO

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA CAPACIDADE RESISTENTE DA LIGAÇÃO AÇO-CONCRETO COM CONECTOR TRELIÇADO

Autor: Paulo Henrique Roberto Moura
Orientador: Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva
Coorientador: Jerfson Moura Lima
Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
Brasília, Abril/2025

Os conectores de cisalhamento são essenciais para a transferência de esforços entre um perfil metálico e uma laje de concreto. Os conectores de cisalhamento convencionais, em especial o *stud bolt*, apresentam restrições que envolvem aspectos relacionados à execução, desempenho estrutural e custo. Por essa razão têm sido propostas alternativas como o Conector Treliçado, que se destaca por apresentar facilidade de execução, comportamento estrutural dúctil, viabilidade técnica e menor custo de produção. No entanto, os ensaios *push-out*, utilizados para estudar esses conectores, são onerosos e custosos. Como alternativa, modelos numéricos vêm sendo empregados para simular esses ensaios, mas muitos apresentam alto custo computacional, limitando sua aplicação. Este trabalho investiga numericamente a capacidade resistente da ligação aço-concreto por meio de um modelo numérico tridimensional não linear de baixo custo computacional desenvolvido no ABAQUS. O modelo reduziu o tempo de processamento de 19 horas para aproximadamente 70 segundos, mantendo a qualidade da análise, com erros inferiores a 5%, em relação a dados experimentais e numérico da literatura. Com base nesse modelo, realizou-se um estudo paramétrico, variando altura, ângulo de abertura, diâmetro e resistências do aço e do concreto para avaliar sua influência na capacidade resistente do conector. Constatou-se que o diâmetro da barra de aço é o fator mais influente, podendo aumentar a capacidade resistente da ligação em até 94%. Por fim, foi proposta uma equação para o cálculo da capacidade resistente da ligação, baseada em um banco de dados gerado por uma rede neural artificial.

Palavras-chave: Conector de cisalhamento treliçado, modelagem numérica, estudo paramétrico, proposição de equação, rede neural artificial.

ABSTRACT

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF STEEL–CONCRETE CONNECTION WITH TRUSS CONNECTOR

Author: Paulo Henrique Roberto Moura
Advisor: Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva
Co-advisor: Jerfson Moura Lima
Post-graduate Program in Structures and Civil Construction
Brasília, April 2025

Shear connectors are essential for transferring forces between a steel profile and a concrete slab. Conventional shear connectors, especially the stud bolt, present limitations related to execution, structural performance, and cost. For this reason, alternatives such as the Truss Connector have been proposed, which stands out for its ease of execution, ductile structural behavior, technical feasibility, and lower production cost. However, push-out tests used to study these connectors are expensive and time-consuming. As an alternative, numerical models have been employed to simulate these tests, but many of them involve high computational costs, limiting their practical application. This study numerically investigates the load-bearing capacity of the steel–concrete connection through a three-dimensional nonlinear numerical model with low computational cost developed in ABAQUS. The model reduced processing time from 19 hours to approximately 70 seconds while maintaining analysis quality, with errors below 5% compared to experimental and numerical data from the literature. Based on this model, a parametric study was conducted by varying the height, opening angle, diameter, and the strengths of steel and concrete to assess their influence on the connector's load-bearing capacity. It was found that the diameter of the steel bar is the most influential factor, potentially increasing the connection's capacity by up to 94%. Finally, an equation for calculating the load-bearing capacity of the connection was proposed, based on a database generated by an artificial neural network.

Keywords: Truss shear connector, numerical modeling, parametric study, equation proposal, artificial neural network.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. JUSTIFICATIVA 4

1.2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS 5

1.3. METODOLOGIA 5

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO 6

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 7

2.1. ESTRUTURAS MISTAS 7

2.2. VIGA MISTA 8

2.3. CONECTOR DE CISALHAMENTO 13

2.3.1. Capacidade Resistente 13

2.3.2. Ductilidade e Rigidez 15

2.4. ENSAIO *PUSH-OUT* 16

2.5. ESTADO DA ARTE: ESTUDOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS COM CONECTORES DE CISALHAMENTO 18

2.5.1. Conector stud bolt 18

2.5.2. Conectores alternativos 20

2.5.3. Conector de Cisalhamento treliçado 27

2.6. PROGRAMA EXPERIMENTAL BARBOSA (2016) 28

2.7. MODELAGEM NUMÉRICA DE LIMA (2018) 33

2.8. *MACHINE LEARNING* E REDES NEURAIS APLICADOS À REGRESSÃO LINEAR 36

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO 38

3.1. IDEALIZAÇÃO DO CONECTOR COM ELEMENTO DE BARRA 3D 38

3.2. ASPECTOS GEOMÉTRICOS 39

3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO, INTERAÇÕES E CARREGAMENTO 40

3.4. MATERIAIS 42

3.4.1. Aço MR250 43

3.4.2. Aço CA50 43

3.4.3. Concreto 45

3.5. ELEMENTOS FINITOS 47

3.6. MÉTODO DE ANÁLISE 48

3.6.1. Dynamic, Explicit 48

4. VALIDAÇÃO 50

4.1. CURVAS CARGA X DESLIZAMENTO 50

4.2. DEFORMADAS DOS CONECTORES 53

4.3. TENSÕES DE *VON MISSES* 56

4.3.1. Nos CTs 57
4.3.2. Na laje de concreto 58
4.4. CAPACIDADE RESISTENTE E CURVAS DE ENERGIA 59
4.5. CUSTO COMPUTACIONAL 63
5. ESTUDO PARAMÉTRICO 64
5.1. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS PARAMÉTRICOS 65
5.2. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA CAPACIDADE RESISTENTE 71
5.3. REDE NEURAL 74
6. EQUAÇÃO PARA O CÁLCULO DA CAPACIDADE RESISTENTE 81
6.1. BANCO DE DADOS 81
6.2. PROPOSTA DA EQUAÇÃO E MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO 82
7. CONCLUSÕES 89
7.1. CONCLUSÕES SOBRE A VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO 89
7.2. CONCLUSÕES ACERCA DO ESTUDO PARAMÉTRICO E EQUAÇÃO PROPOSTA 90
7.3. SUGESTÕES DE TRABALHO FUTUROS 92
BIBLIOGRAFIA 93
APÊNDICE 100
A. CAPACIDADE RESISTENTE DOS MODELOS NUMÉRICOS 101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Conectores normatizados pela ABNT NBR 8800:2024 2
Figura 2: Exemplos de Conectores de Cisalhamento Alternativos 3
Figura 3: Fluxograma da pesquisa..... 6
Figura 4: Tipos de Pilares Mistos (Adaptado de Queiroz et al., 2012) 7
Figura 5: Viga mista de aço e concreto sem ação mista..... 9
Figura 6: Viga mista de aço e concreto com ação mista 10
Figura 7: Fluxo de Cisalhamento 11
Figura 8: Variação da deformação da seção da viga mista para diferentes graus de conexão (α) (modificado de Salmon et al., 2009). 12
Figura 9: Esforços ao longo da viga mista de aço e concreto (CAVALCANTE, 2010)16
Figura 10: Ensaio push-out (modificado de EN 1994-1-1:2004) em mm..... 17
Figura 11: Determinação do slip (EN 1994-1-1:2004) 18
Figura 12: Conector de cisalhamento Perfobond (KOTINDA, 2006) 21
Figura 13: Características geométricas dos conectores Perfobond ensaiados por Veldanda (2010) (VERÍSSIMO, 2007 apud VELDANDA, 1991)..... 21
Figura 14: Conectores alternativos ensaiados por Galjaad e Walraven (2001)..... 22
Figura 15: Conector de Cisalhamento Crestbond (VERÍSSIMO, 2007) 22
Figura 16: Conector "V" (CAVALCANTE, 2010)..... 23
Figura 17: Processo de fabricação do Conector "V"..... 23
Figura 18: Conector em forma de "V" angular (SHARIATI *et al*., 2016)..... 24
Figura 19: Conector tipo "Y" (KIM et al., 2017)..... 25
Figura 20: Conector formado a partir do perfil top-hat (LACKI et al., 2019) 25
Figura 21: Conectores de cisalhamento formados a partir de aço laminado (QIU et al., 2020)..... 26
Figura 22: Conector híbrido desmontável (HE et al., 2023) 26
Figura 23: Conector Treliçado (BARBOSA, 2016)..... 29
Figura 24: Conector de Cisalhamento Treliçado..... 30
Figura 25: Geometria do ensaio experimental de Barbosa (2016)..... 31
Figura 26: Curva Carga x Deslocamento – CT Isósceles 8mm (adaptado de Barbosa 2016)..... 31
Figura 27: Curva Carga x Deslocamento – CT Isósceles 10mm (adaptado de Barbosa 2016)..... 32

Figura 28: Curva Carga x Deslocament – CT Isósceles 12,5mm (adaptado de Barbosa 2016) 32
Figura 29: Elementos finitos Lima (2018) 33
Figura 30: Curvas carga-deslizamento para o modelo I8 (LIMA, 2018) 34
Figura 31: Curvas carga-deslizamento para o modelo I-10 (LIMA, 2018) 34
Figura 32: Curvas carga-deslizamento para o modelo I12,5 (LIMA, 2018) 35
Figura 33: Idealização do CT com elemento de barra 3D 38
Figura 34: Redução do espécime experimental 39
Figura 35: Partes constituintes do modelo numérico 39
Figura 36: Modelo Numérico 40
Figura 37: Coupling e Pontos de Referência 41
Figura 38: Interações entre as partes 41
Figura 39: Condição de Contorno e Carregamento 42
Figura 40: Modelo elasto-plástico tri-linear para o aço CA50 (NGUYEN; KIM, 2009) 43
Figura 41: Relação tensão-deformação para o concreto 46
Figura 42: Malha de Elementos Finitos para o modelo numérico de 12,5 mm 48
Figura 43: Curva MEF-EXP Carga x Deslizamento modelo de 8,0 mm 50
Figura 44: Curva MEF-EXP Carga x Deslizamento modelo de 10,0 mm 51
Figura 45: Curva MEF-EXP Carga x Deslizamento modelo de 12,5 mm 52
Figura 46: Curva MEF (Autor) – MEF (LIMA, 2018) Carga x Deslizamento 52
Figura 47: Deformada dos conectores de 8,0 mm 54
Figura 48: Deformada dos conectores de 10,0 mm 55
Figura 49: Deformada dos conectores de 12,5 mm 56
Figura 50: Tensões de von Misses nos Conectores 57
Figura 51: Tensões de von Misses no Concreto 59
Figura 52: Parâmetros geométricos do CT (LIMA, 2018) 65
Figura 53: CTs com ângulo de Abertura 60° e suas relações $\boldsymbol{hlab}$ (mm) 66
Figura 54: CTs com ângulo de Abertura 40° e suas relações $\boldsymbol{hlab}$ (mm) 67
Figura 55: CTs com ângulo de Abertura 50° e suas relações $\boldsymbol{hlab}$ (mm) 68
Figura 56: CTs com ângulo de Abertura 70° e suas relações $\boldsymbol{hlab}$ (mm) 69
Figura 57: CTs com ângulo de Abertura 80° e suas relações $\boldsymbol{hlab}$ (mm) 70
Figura 58: Parte de código em Python utilizado no estudo paramétrico 71
Figura 59: Gráficos de Dispersão para cada parâmetro estudado 72

Figura 60: Regressões geradas pelas RNAs 78
Figura 61: Heatmaps para as RNAs 79
Figura 62: Novos valores das variáveis independentes 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistema de Unidades adotada 38
Tabela 2: Modelo Constitutivo para o Aço MR250 43
Tabela 3: Modelo Constitutivo para o Aço CA50 de 8,0 mm (BARBOSA, 2016) 44
Tabela 4: Modelo Constitutivo para o Aço CA50 de 10,0 mm (BARBOSA, 2016) 44
Tabela 5: Modelo Constitutivo para o Aço CA50 de 12,5 mm (BARBOSA, 2016) 45
Tabela 6: Parâmetros Plásticos para o CPDM..... 45
Tabela 7: Propriedades do Concreto e Parâmetros do Modelo Constitutivo..... 47
Tabela 8: Capacidade Resistente do CT de 8,0 mm 60
Tabela 9: Capacidade Resistente do CT de 10,0 mm 60
Tabela 10: Capacidade Resistente do CT de 12,5 mm 61
Tabela 11: Dados de Energia Cinética e Interna dos CTs 61
Tabela 12: Custo Computacional 63
Tabela 13: Valores Paramétricos..... 64
Tabela 14: Influência dos Parâmetros Geométricos 73
Tabela 15: Influência dos Parâmetros dos Materiais..... 74
Tabela 16: Métricas de Avaliação das RNAs..... 77
Tabela 17: Análise dimensional da Equação proposta 86
Tabela 18: Distribuição das amostras por faixa de erro 87
Tabela 19: Distribuição das amostras por faixa de erro para o banco de dados inicial. 88

LISTA DE ABREVIAÇÕES

CT – Conector Treliçado

CR – Capacidade Resistente

ECC – *Engineered Cementitious Composites* (Compósitos cimentícios projetados)

LN – Linha Neutra

MEF – Método dos Elementos Finitos

ML – *Machine Learning*

MAE - *Mean Absolute Error*

MAPE - *Mean Absolute Percentage Error*

MPE - *Mean Percentage Error*

MSE - *Mean Squared Error*

ReLU – *Rectified Linear Unit*

RMSE - *Root Mean Squared Error*

RNA – Rede Neural Artificial

NC – Normal Concrete (Concreto convencional)

UHPC – *Ultra High Performance Concrete* (Concreto de ultra alto desempenho)

LISTA DE SÍMBOLOS

$\boldsymbol{A_{cs}}$ é a área de seção transversal do conector;

$\boldsymbol{C}$ é a matriz de amortecimento;

$\boldsymbol{E_{cm}}$ é o módulo de elasticidade médio;

$\boldsymbol{f_{ck}}$ é a resistência característica do concreto;

$\boldsymbol{F_h}$ o menor valor entre a resistência ao escoamento da seção bruta do perfil de aço e a resistência à compressão da seção da laje;

$\boldsymbol{f_{int}}$ é o vetor de forças internas;

$\boldsymbol{f_{ext}}$ é o vetor de forças externas;

$\boldsymbol{f_t}$ é a resistência à tração;

$\boldsymbol{f_u}$ é a resistência última especificada do material do conector;

$\boldsymbol{f_{ucs}}$ é a resistência a ruptura do aço do conector;

$\boldsymbol{f_{ut}}$ é a resistência última do material do conector obtida por ensaio;

$\boldsymbol{I^j}$ é o vetor de forças internas;

$\boldsymbol{L_{cs}}$ é o comprimento do perfil U;

$\boldsymbol{M^{NJ}}$ é a matriz diagonal de massa;

$\boldsymbol{N}$ é o número total de amostras;

$\boldsymbol{P^j}$ é o vetor de forças externas;

$\boldsymbol{P_{Rk}}$ é a resistência característica;

$\boldsymbol{P_{Rd}}$ é a resistência de projeto;

$\boldsymbol{R_g}$ é um coeficiente para a consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;

$\boldsymbol{R_p}$ é um coeficiente para a consideração da posição do conector;

$\boldsymbol{t_{fcs}}$ é a espessura da mesa do conector;

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

$\dot{\boldsymbol{u}}$ é a primeira derivada do vetor de deslocamento (velocidade);

$\ddot{\boldsymbol{u}}_{(i)}^{\boldsymbol{N}}$ é a segunda derivada do vetor de deslocamentos (aceleração);

$\boldsymbol{y_i}$ é o valor real da amostra;

$\boldsymbol{\hat{y}_i}$ é o valor predito;

$\boldsymbol{\overline{y}_i}$ é a média dos valores reais;

$\boldsymbol{\alpha}$ grau de conexão/grau de interação;

$\boldsymbol{\delta_u}$ é a capacidade de *slip*;

$\boldsymbol{\delta_{uk}}$ é o *slip* característico;

γ_V é um fator de segurança;

γ_{cs} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector;

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a questão ambiental tem alcançado todas as esferas da sociedade, inclusive a construção civil, o que demanda soluções mais eficientes e sustentáveis. Essas demandas impulsionam inovações tecnológicas que transformam o setor. Podem-se destacar o uso racional dos materiais, o aumento da produtividade e a redução dos impactos ambientais.

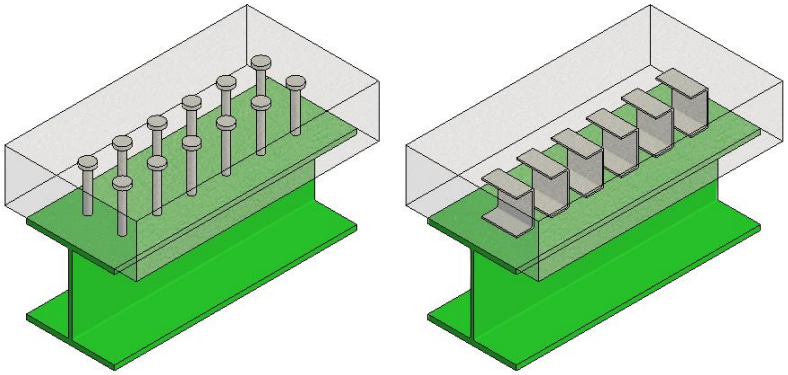
Nesse contexto, surgem os sistemas estruturais mistos de aço e concreto. Nas vigas mistas, por exemplo, uma laje de concreto é solidarizada a um perfil metálico, combinando-se a resistência à compressão do concreto com a resistência à tração do aço. Desse modo, proporciona-se uma solução estrutural mais leve e mais rígida do que as vigas tradicionais de concreto ou aço.

Outra vantagem desse sistema é a dispensa de fôrmas e escoramentos, o que agiliza o processo, utiliza menos materiais e torna os canteiros de obra mais limpos. Além disso, pode-se destacar que a combinação dos materiais reduz o consumo de cimento, cuja produção é responsável por aproximadamente 8% das emissões mundiais de gás carbônico (HAJEK, 2017). Esses aspectos tornam os sistemas estruturais mistos uma alternativa viável do ponto de vista econômico, estrutural e ambiental.

. No caso de vigas mistas de aço e concreto, quando submetidas à esforços, surgem na interface laje-viga esforços cisalhantes longitudinais e transversais ao eixo dos elementos. Cabe ao atrito, à aderência e aos conectores de cisalhamento a transmissão desses esforços entre as partes, garantindo o funcionamento solidário entre elas.

Devido ao caráter imprevisível do atrito e da aderência, os conectores de cisalhamento são o principal mecanismo de transmissão dos esforços. Desse modo, eles se tornam indispensáveis e fundamentais em vigas mistas de aço e concreto, assim como é fundamental o entendimento do seu funcionamento e comportamento quando submetidos a carregamentos.

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2024 preconiza dois tipos de conectores: *stud bolt* (Figura 1a) e perfil "U" (Figura 1b). O conector *stud bolt* é amplamente utilizado no mundo (CÂNDIDO-MARTINS; COSTA-NEVES E VELLASCO, 2010; KIM *et al*., 2016; NGUYEN; KIM, 2009) e, além da normativa brasileira, as normas EN 1994-1:2004 e AASHTO LRFD:2004 também prescrevem seu dimensionamento.



(a) *Stud bolt* (b) Perfil “U”

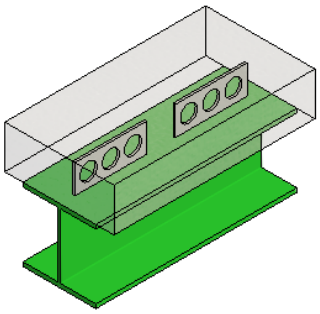
Figura 1: Conectores normatizados pela ABNT NBR 8800:2024

A alta produtividade, a adequação a sistemas estruturais diversos e a facilidade na disposição da armadura de reforço da laje são as principais vantagens desse tipo de conector (SHARIATI *et al*., 2016; BONILLA *et al*., 2019). A necessidade de um gerador de alta potência (225 kV), a susceptibilidade à fadiga e os custos de importação oneram seu uso, podendo inclusive inviabilizar sua utilização (BEZERRA *et al*., 2018-a; LIMA, 2021). Além disso, Chien e Ritchie (1984) destacam que a resistência da solda que une o conector ao perfil pode ser afetada por fatores como condições climáticas, pintura, estado do perfil e das fôrmas.

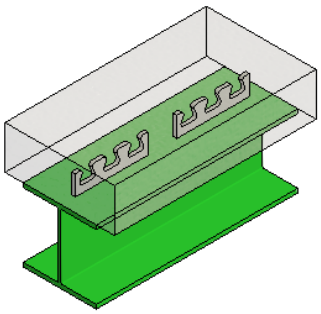
Já o conector tipo perfil “U” possui baixa produtividade de instalação e é mais indicado para vigas mistas com lajes maciças, o que limita sua aplicação (VERÍSSIMO, 2007). Por essas razões, esse conector foi gradualmente substituído em muitos países industrializados. Contudo, devido à sua área de aderência, apresenta melhor distribuição de tensões.

Diante das desvantagens dos conectores preconizados e da grande importância dos conectores de cisalhamento, muitos pesquisadores empreenderam esforços para o desenvolvimento de conectores alternativos. Esses conectores buscam fornecer uma solução viável, econômica e estrutural, com boa produtividade e baixo custo.

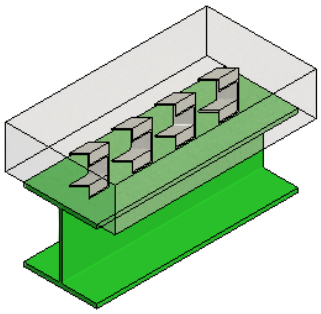
Entre os pesquisadores, citam-se: Leonhardt *et al*., (1987) (*Perfobond* – Figura 2a), Veríssimo (2007) (*Crestbond* – Figura 2b), Cavalcante (2010) (Conector “V” – Figura 2c), Galjaad e Walraven (2001) (*Perfobond* sinuoso – Figura 2d, tira ondulada – Figura 2e e perfil T – Figura 2f), Vellasco *et al*., (2007) (T-Rib – Figura 2g) e He *et al*., (2023) propuseram um conector de cisalhamento desmontável soldado (*welded demountable shear conector – WDSC*).



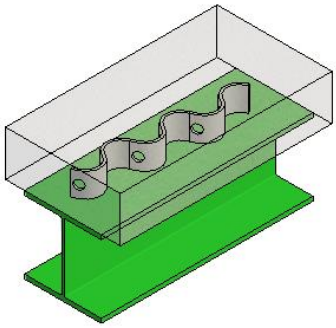
(a) *Perfobond*
(LEONHARDT *et al*., 1987)



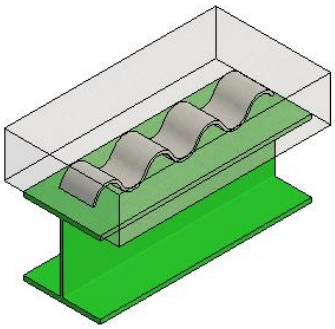
(b) *Crestbond*
(VERÍSSIMO, 2007)



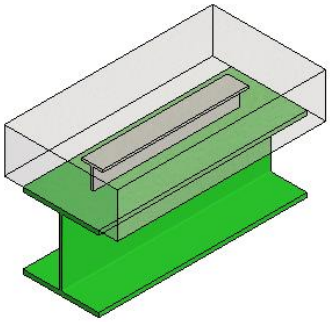
(c) Conector "V"
(CAVALCANTE, 2010)



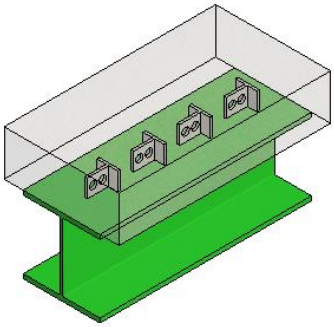
(d) *Perfobond* sinuoso
(GALJAAD; WALRAVEN, 2001)



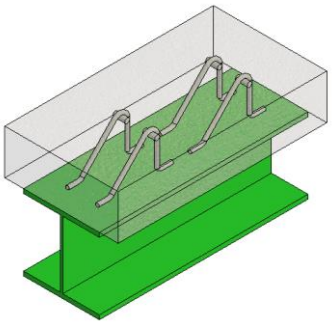
(e) Tira ondulada
(GALJAAD; WALRAVEN, 2001)



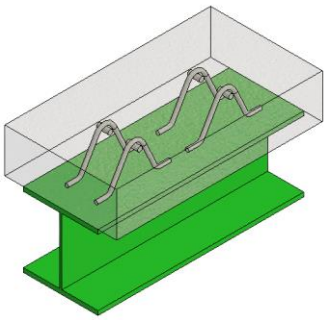
(f) Perfil T
(GALJAAD; WALRAVEN, 2001)



(g) T-Rib
(VELLASCO *et al*., 2007)



(h) CT Reto
(BARBOSA, 2016)



(i) CT Isósceles
(BARBOSA, 2016)

Figura 2: Exemplos de Conectores de Cisalhamento Alternativos

No desenvolvimento de conectores alternativos, Barbosa (2016) (ver seção 2.6) propôs o conector de cisalhamento treliçado (CT) (Figura 2h e 2i). Ele apresenta fácil instalação, pois é executado com solda comum e equipamentos usuais, não necessitando de mão de obra especializada, além de ter baixo custo, já que é produzido com aço CA50. Do ponto de vista estrutural, os resultados dos ensaios experimentais revelaram que ele

possui capacidade resistente superior à do *stud bolt*, comportamento dúctil, *sl*ip e *uplift* semelhantes aos do *stud*, conforme a norma EN 1994-1:2004.

Tais características motivaram diversos pesquisadores a desenvolverem estudos a fim de avaliar o comportamento do CT. Lima (2020) (ver seção 2.7) desenvolveu um estudo numérico para avaliar a influência da altura do conector, do ângulo de abertura, do diâmetro e da resistência do concreto na capacidade resistente e, a partir de seus resultados, propôs uma equação para o cálculo dessa capacidade.

Lima (2022) desenvolveu um estudo numérico com o CT de ângulo reto, validando seu modelo com os dados de Barbosa (2016). Com o modelo calibrado, a orientação do conector foi invertida, de modo que sua haste inclinada fosse submetida à tração. Essa reorientação conferiu um acréscimo de 17,86% na capacidade resistente.

Lima (2024) realizou um estudo experimental aplicando o CT isósceles em vigas mistas de aço e concreto. Foram ensaiadas três vigas mistas com o CT isósceles em tamanho real. A partir dos resultados confirmou-se que o conector possui uso potencial, eficiência e capacidade.

Moura (2024) desenvolveu um estudo numérico do ensaio push-out com o CT de ângulo reto. O modelo foi calibrado com os resultados experimentais de Barbosa (2016), e, a partir da validação, foi realizado um estudo paramétrico das propriedades geométricas do conector.

1.1. JUSTIFICATIVA

No estudo de novos conectores, realiza-se o ensaio *push-out*, preconizado pela norma EN 1994-1:2004. Esse ensaio consiste em um teste de cisalhamento direto que avalia a capacidade resistente do conector, sua ductilidade e seu *uplift* – características fundamentais para o estudo de conectores alternativos. Contudo, os materiais, a construção dos espécimes e os ensaios tornam os experimentos onerosos.

Diante desses desafios, os modelos numéricos surgem como uma poderosa ferramenta para o estudo de conectores de cisalhamento (ELLOBODY; YOUNG, 2006-a). Eles reduzem drasticamente o custo dos ensaios, o tempo de execução e ainda possibilitam a análise de diversos parâmetros em qualquer ponto, ao contrário dos espécimes experimentais.

Embora o ensaio *push-out* apresente alta complexidade, por envolver diferentes materiais, geometrias não convencionais e muitos contatos, a modelagem numérica é

capaz de simulá-lo com precisão. Isso é constatado nas pesquisas de Lam e El-Lobody (2005), El-Lobody e Young (2006), Qureshi, Lam e Ye (2011), Dutra (2014), Xu *et al*. (2014), Bonilla *et al*. (2015), Ellobody e Young (2015), Kim *et al*. (2016), Shariati *et al*. (2016), Han *et al*. (2017), Kim *et al*. (2017), Lacki *et al*. (2019), Kożuch e Lorenc (2020), Qiu *et al*. (2020), Mirambell *et al*. (2021) e He *et al*. (2023), que desenvolveram pesquisas numéricas com conectores alternativos.

Contudo, devido à alta complexidade do ensaio *push-out*, os modelos numéricos tornam-se robustos, demandando um alto custo computacional. Isso ocorre porque os modelos numéricos envolvem diversos materiais, levando-os ao regime não-linear, além de interações e contatos, o que confere alta complexidade. Esse custo computacional faz com que os modelos necessitem de diversas horas para sua solução. O modelo de Lima (2018), por exemplo, requeria aproximadamente 19 horas para finalizar o processamento.

Tendo em vista o alto custo computacional, é importante o desenvolvimento de modelos numéricos que combinem a simulação satisfatória do ensaio push-out com modelos que demandem menor custo computacional

1.2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar o efeito dos aspectos geométricos – altura, ângulo de abertura e diâmetro – e das resistências do concreto e do aço na capacidade resistente do conector de cisalhamento treliçado.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um modelo numérico tridimensional não linear, via MEF, do ensaio *push-out* com o CT isósceles no software ABAQUS 2021, que demande menor custo computacional em relação aos modelos da literatura, discretizando o conector com elemento finito de barra 3D.;
- Avaliar a influência dos aspectos geométricos e das resistências dos materiais na capacidade resistente usando Redes Neurais Artificiais;
- Propor uma equação para o cálculo da capacidade resistente com base nos parâmetros estudados.

1.3. METODOLOGIA

O modelo numérico tridimensional não linear do ensaio *push-out* com o CT isósceles foi desenvolvido no *software* ABAQUS 2021 (Figura 3). O modelo foi validado com base nos resultados experimentais de Barbosa (2016) e nos resultados numéricos da literatura. A calibração foi realizada com base nas curvas Carga × Deslizamento, nas configurações deformadas, no modo de ruptura e na capacidade resistente.

Com o modelo validado, foi desenvolvido um estudo paramétrico para avaliar a influência da altura do conector, do ângulo de abertura, do diâmetro, da resistência do concreto e da resistência do aço na capacidade resistente da ligação, estudando um total de 840 modelos paramétricos. A partir dos resultados, foram treinadas RNAs e criado um banco de dados. A partir desse banco de dados foi proposta uma equação para estimar a capacidade resistente.

Figura 3: Fluxograma da pesquisa

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2, é apresentada, inicialmente, uma revisão da literatura sobre estruturas mistas, vigas mistas, conectores de cisalhamento e ensaio *push-out*. Em seguida, é elaborado um estado da arte sobre os conectores de cisalhamento alternativos, com foco nos estudos numéricos e experimentais desenvolvidos sobre conectores de cisalhamento, especificamente o CT. Por fim, são apresentados os estudos utilizados para a validação do modelo desenvolvido: Barbosa (2016) e Lima (2018).

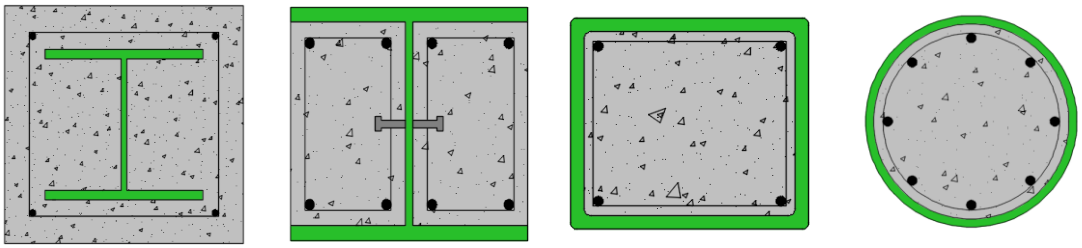
No Capítulo 3, é apresentado todo o processo de construção do modelo numérico, com seus parâmetros e propriedades. Em seguida, no Capítulo 4, é apresentado o processo de validação do modelo com base nos resultados da literatura. No Capítulo 5, é apresentado o estudo paramétrico e todo o tratamento dos dados obtidos, os quais serviram para a proposição da equação de cálculo da capacidade resistente. No capítulo 6, é apresentada a criação do novo banco de dados a partir das RNAs e processo de proposição da equação para o cálculo da capacidade resistente. Por fim, no Capítulo 7, estão condensadas todas as conclusões das etapas do presente estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ESTRUTURAS MISTAS

Sistemas mistos de aço e concreto são aqueles nos quais um perfil metálico é unido a uma peça de concreto de modo que trabalhem de maneira solidária como um único corpo. A partir dessa união podem surgir os elementos: pilar misto, viga mista, laje mista e ligação mista (Figura 4)..

Nos pilares mistos, um perfil metálico é envolvido total ou parcialmente por concreto ou preenchido em seções vazias. Nesse sistema há um aumento na contribuição do aço para a resistência do pilar, podendo chegar a 90%, enquanto em pilares de concreto, a contribuição do aço atinge normalmente 40%, de acordo com a ABNT NBR 8800:2024.



(a) Envolvido totalmente | (b) Envolvido parcialmente | (c) Perfil quadrado preenchido | (d) Perfil circular preenchido

(e) Fôrma trapezoidal com mossas | (f) Fôrmas reentrantes

Figura 4: Tipos de Pilares Mistos (Adaptado de Queiroz *et al*., 2012)

Nas lajes mistas ocorre a solidarização entre uma fôrma de aço e concreto moldado *in loco*. Elas também são chamadas de lajes com fôrma incorporada. A fôrma de aço atua resistindo aos esforços tanto na fase de cura quanto na fase de serviço. A ligação entre a fôrma e a laje pode ocorrer por meio das mossas (Figura 4e) ou das reentrâncias (Figura 4f).

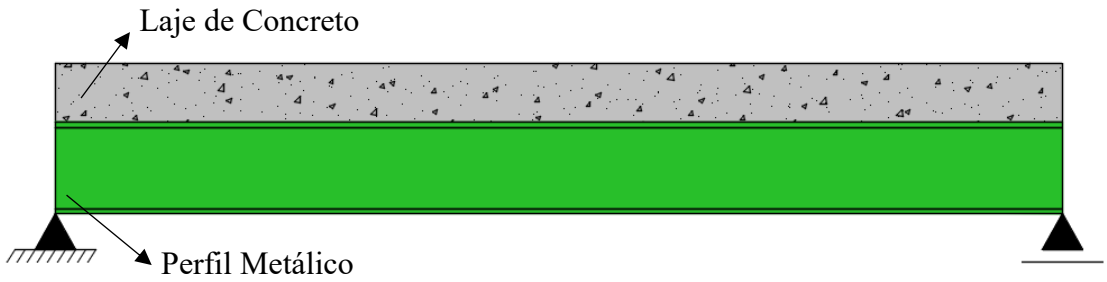
Nas vigas mistas, uma viga metálica de alma cheia é unida a uma laje de concreto (ver item 2.2). Nesse sistema, a viga metálica é responsável por resistir principalmente aos esforços de tração, enquanto a laje resiste aos esforços de compressão. A conexão entre as partes ocorre por meio de peças mecânicas chamadas conectores de cisalhamento

2.2. VIGA MISTA

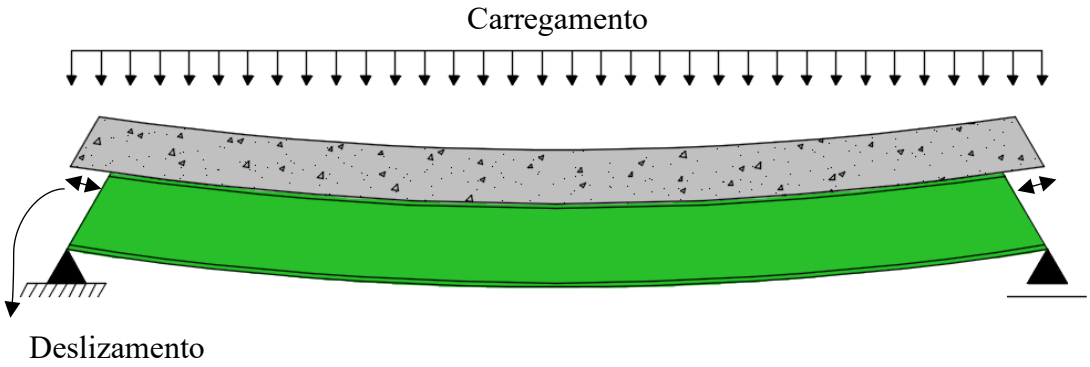
A viga mista de aço e concreto consiste em um perfil metálico simétrico, em relação ao eixo de flexão, solidarizado a uma laje de concreto que pode ser maciça moldada in loco, mista ou pré-laje pré-moldada (ABNT NBR 8800:2024). Como mencionado no capítulo anterior, o funcionamento da viga mista depende da transmissão de esforços entre viga e laje. Essa transmissão ocorre por meio da aderência, atrito e dos conectores de cisalhamento. Contudo, devido à imprevisibilidade da aderência e do atrito, os conectores são considerados os únicos mecanismos responsáveis pela transmissão (QURESHI; LAM; YE, 2011).

Quando submetida a carregamento, a viga mista de aço e concreto sofre flexão, gerando um fluxo de cisalhamento na interface aço-concreto, que é resistido pelos conectores. Além disso, surge uma força transversal, denominada *uplift*, que tende a separar a laje da viga. Os conectores de cisalhamento são responsáveis por transmitir os esforços cortantes entre o perfil metálico e a laje de concreto. A relação entre o cisalhamento efetivamente resistido por esses conectores e o cisalhamento total é denominada grau de interação. Esse parâmetro define a eficiência na transferência de esforços entre os materiais, influenciando diretamente a rigidez e a capacidade resistente da viga mista.

Na Figura 5a, está representada uma viga biapoiada sem ação mista, ou seja, não ocorre transmissão de esforços entre a laje e o perfil devido à ausência de conectores (Figura 5b). Nessa situação, as partes trabalham isoladamente, e a laje desliza livremente sobre a viga, que apresenta um encurtamento mais significativo nas fibras superiores (SALMON *et al*., 2009).



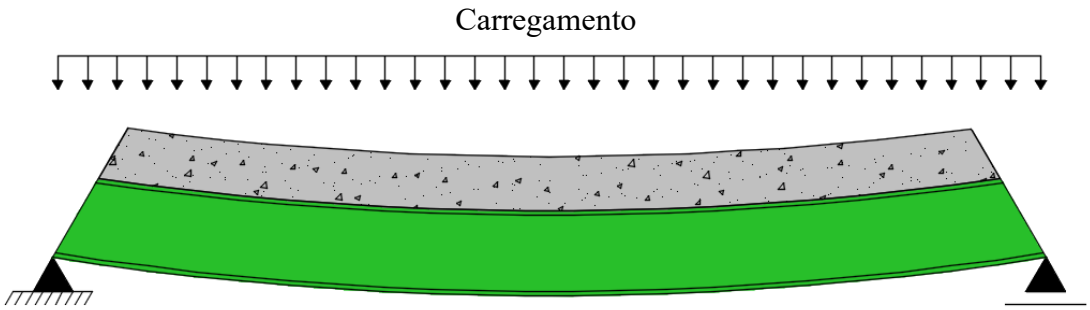
(a) Viga mista biapoiada sem ação mista – Indeformada



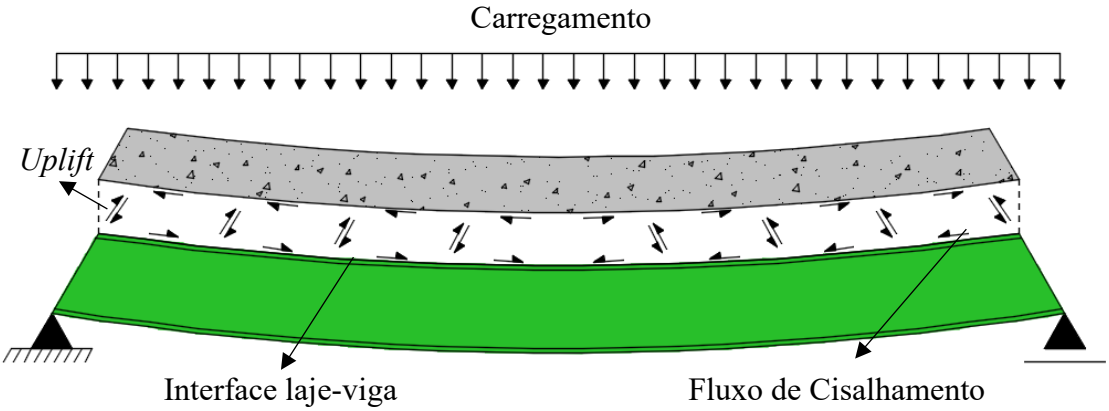
(b) Viga biapoiada sem ação mista – Deformada

Figura 5: Viga mista de aço e concreto sem ação mista

Na Figura 6a, a mesma viga é submetida à flexão, porém, com a presença de conectores de cisalhamento na interface laje-viga. Observa-se que as partes deformam solidariamente, como um corpo único, com a laje submetida à compressão e a viga à tração. Assim, aproveitam-se ao máximo as propriedades mecânicas de ambos os materiais. Já na Figura 6b, estão representados os esforços que surgem na interface e que devem ser resistidos pelos conectores: *uplift* e deslizamento longitudinal (*slip*) (PFEIL;PFEIL, 2008).



(a) Viga mista biapoiada com ação mista – Deformada



(b) Esforços gerados na interface laje-viga em vigas mistas

Figura 6: Viga mista de aço e concreto com ação mista

Na Figura 7, é apresentado o fluxo de cisalhamento que surge na interface laje-viga em decorrência do momento fletor. Esses fenômenos são inversamente proporcionais, isto é, onde o momento fletor é máximo, o fluxo de cisalhamento é nulo, e vice-versa. Esse comportamento explica porque os conectores de cisalhamento das extremidades da viga mista biapoiada são mais solicitados do que aqueles próximos ao centro do vão.

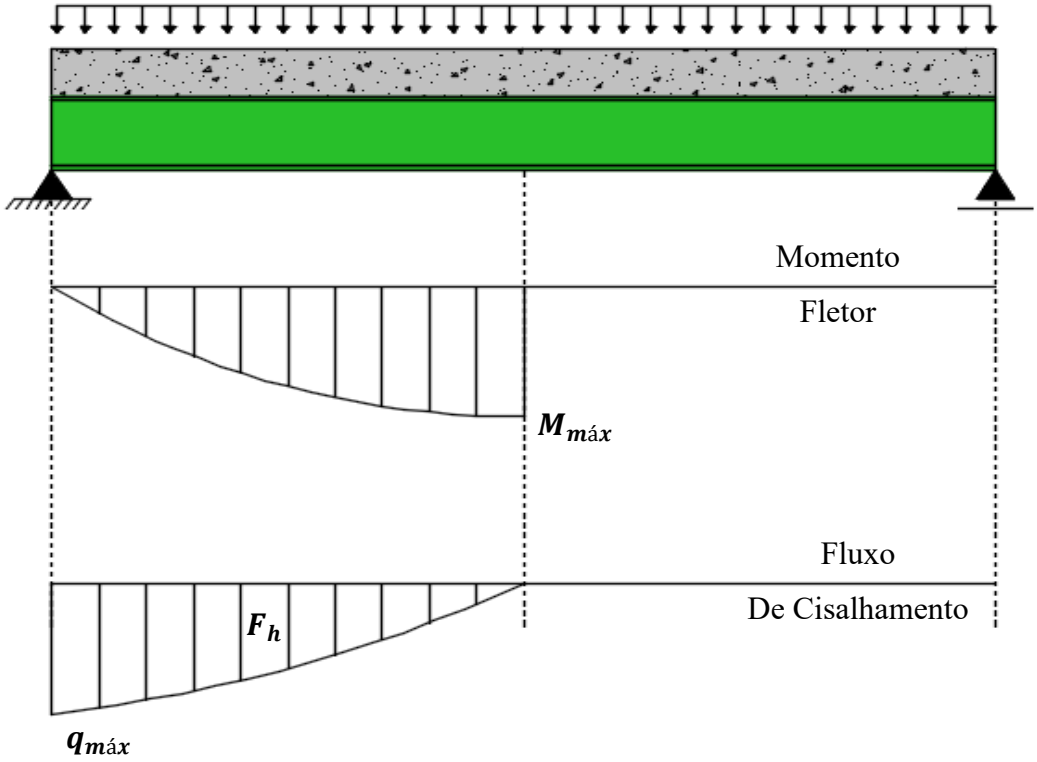
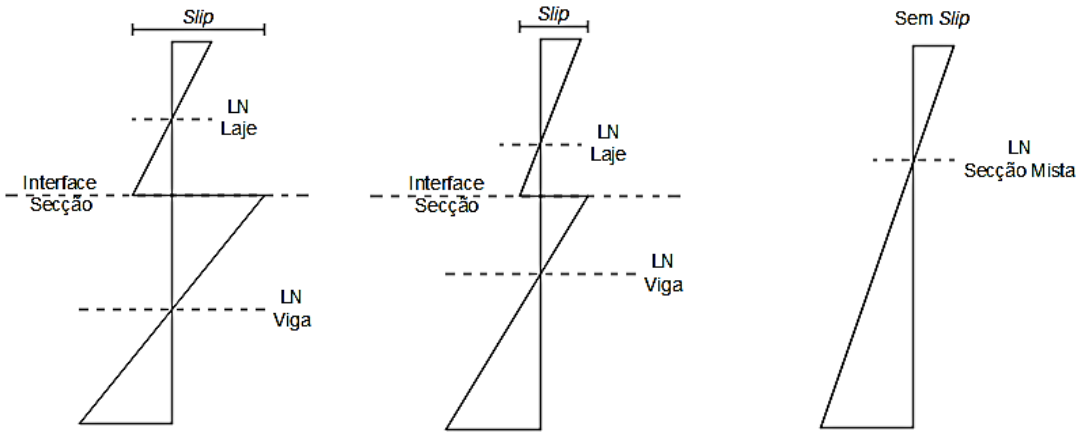


Figura 7: Fluxo de Cisalhamento

Ainda na Figura 7, o termo F_h indica a resultante do fluxo de cisalhamento e pode ser calculado pela Eq. 1. Portanto, essa resultante é utilizada para o dimensionamento da ligação aço-concreto. Esse valor corresponde ao menor valor entre a resistência ao escoamento da seção bruta do perfil de aço e a resistência à compressão da seção da laje, considerando a largura colaborante (PFEIL;PFEIL, 2008).

$$F_h = \int_0^{L/2} q dx \tag{1}$$

O funcionamento da secção mista está relacionado a resistência da ligação aço-concreto. Ela está associada à quantidade de conectores que compõem a secção mista definindo o grau de interação. Para o grau de interação igual a 1, interação total, a ligação aço-concreto tem resistência suficiente para resistir a totalidade do esforço cisalhante gerado. A ABNT NBR 8800:2024 traz dois conceitos: grau de conexão e grau de interação, nesse trabalho utiliza-se grau de conexão para ambos.



(a) Sem Conexão (b) Conexão Parcial (c) Conexão Total

Figura 8: Variação da deformação da seção da viga mista para diferentes graus de conexão (α) (modificado de Salmon *et al.,* 2009).

Para uma seção sem conexão ($\alpha = 0$) (Figura 8a), o comportamento é semelhante ao apresentado na Figura 5. Do ponto de vista da deformação da seção transversal, a ausência de conexão resulta no surgimento de duas linhas neutras, uma na laje e outra no perfil (Figura 8a). Desse modo, ambas as partes estão submetidas à compressão e à tração. Logo, esse sistema torna-se ineficiente (SALMON *et al.,* 2009).

Para conexões parciais ($\alpha < 1$) (Figura 8b), os esforços são transmitidos parcialmente resultando em deslizamento entre o perfil e a laje, situação intermediária. Nesse caso, há conectores, mas sua quantidade é insuficiente para resistir à totalidade do fluxo de cisalhamento. Nessa situação ainda são formadas duas linhas neutras (Figura 8b) (PFEIL;PFEIL, 2008).

Contudo, percebe-se um deslocamento dessas linhas, resultando em uma laje submetida principalmente à compressão, com uma pequena seção submetida à tração. De forma semelhante, no perfil ocorre o mesmo fenômeno: ele fica submetido majoritariamente à tração, embora ainda sofra compressão.

Um grau de conexão total ($\alpha \geq 1$) (Figura 8c) possibilitaria a transmissão completa dos esforços na viga mista, impedindo o deslizamento entre as partes. No entanto, na prática, mesmo com um grau de conexão total, ainda há deslizamento entre os elementos. Isso ocorre porque, quando o conector é submetido ao fluxo de cisalhamento, ele se deforma, resultando consequentemente nesse deslizamento. Portanto, para uma conexão total, o deslizamento é considerado desprezível (SALMON *et al.,* 2009).

Para esse grau de conexão, ocorre a formação de uma linha neutra (Figura 8c). Ela pode estar na laje ou no perfil metálico, determinando os tipos de esforços aos quais as partes estão submetidas. Se a linha neutra estiver no perfil, a laje estará completamente submetida à compressão, enquanto o perfil estará submetido tanto tração quanto compressão. No caso de a LN estar na laje, ocorre o contrário (PFEIL;PFEIL, 2008).

O modo de ruptura da seção mista é influenciado diretamente pelo grau de conexão, resistência da ligação aço-concreto. Para um grau de conexão total, a resistência da ligação é capaz de resistir a totalidade do cisalhamento gerado na interface. Desse modo, a ruptura não ocorre na ligação, mas a partir do esforço flexiona. Já quando há na secção mista um grau de conexão parcial, a resistência da ligação é inferior, provocando uma deformação maior dos conectores desse modo a ruptura dá-se na ligação.

2.3. CONECTOR DE CISALHAMENTO

A norma europeia EN 1994-1-1:2004 define o conector de cisalhamento como um dispositivo mecânico responsável pela transferência de esforços entre o perfil metálico e a laje de concreto, assegurando o funcionamento comportamento conjunto entre os dois materiais. Embora outros fenômenos, como atrito e aderência, também contribuam para a transferência de esforços na interface entre aço e concreto, esses efeitos são complexos e difíceis de quantificar. Por isso, tanto a norma europeia quanto a ABNT NBR 8800:2024 não consideram esses efeitos no dimensionamento de elementos estruturais mistos.

Em vigas mistas de aço e concreto esses conectores podem ser soldados ou cravados na viga metálica e posteriormente embutidos na laje de concreto. Com a função de resistir aos esforços cisalhantes longitudinais, impedindo o deslizamento relativo entre o perfil e a laje (*Slip*) como também à afastamento transversal (*Uplift*). O comportamento da viga mista está intimamente ligado ao dos conectores de cisalhamento.

A capacidade resistente, a ductilidade e a rigidez são as principais características dos conectores de cisalhamento. Elas podem ser determinadas através do ensaio *push-out*, normatizado pela EN 1994-1-1:2004.

2.3.1. Capacidade Resistente

A capacidade resistente da ligação aço-concreto é determinada de acordo com a norma EN 1994-1-1:2004, com base no ensaio *push-out*. A norma estabelece que três espécimes push-out idênticos devem ser testados com o conector que se deseja avaliar. Para a validação dos resultados, a carga máxima média obtida e a carga de cada espécime não podem diferir em mais de 10%. Caso essa relação não seja atendida, devem ser realizados três novos ensaios.

A partir dos dados obtidos, a capacidade resistente do conector é determinada pela Eq. 2, retirada do Anexo B (B.2.5) da EN 1994-1-1:2004, apresentada a seguir:

$$P_{Rd} = \frac{f_u}{f_{ut}} \frac{P_{Rk}}{\gamma_V} \leq \frac{P_{Rk}}{\gamma_V} \tag{2}$$

Onde:

f_u é a resistência última especificada do material do conector;

f_{ut} é a resistência última do material do conector obtida por ensaio;

P_{Rk} é a resistência característica, calculada a partir do menor valor obtido pelo experimento minorado em 10% e dividido pelo número de conectores do espécime;

γ_V é um fator de segurança, 1,25;

P_{Rd} é a resistência de projeto

O item 4.2 do anexo O da ABNT NBR 8800:2024 traz as expressões para o cálculo da capacidade resistente dos conectores tipo do *stud bolt* (menor valor entre as Eq. 3 e 4). Para o perfil 'U', a equação utilizada é a Eq. 5. Nas equações Eq. 3 e 5 percebe-se que é considerada apenas a resistência do concreto, desse modo é levado em consideração a ruptura do concreto por esmagamento. Já na equação Eq. 5 é considerada a resistência apenas do aço, considerando a ruptura da ligação pelo escoamento do aço, do conector.

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs}\sqrt{f_{ck}E_c}}{\gamma_{cs}} \tag{3}$$

$$Q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \tag{4}$$

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

Onde:

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

f_{ck} é a resistência característica do concreto;

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

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

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

R_g é um coeficiente para a consideração do efeito de atuação de grupos de conectores, item 4.2.1.2 do mesmo anexo;

R_p é um coeficiente para a consideração da posição do conector, item 4.2.1.3 do mesmo anexo;

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.

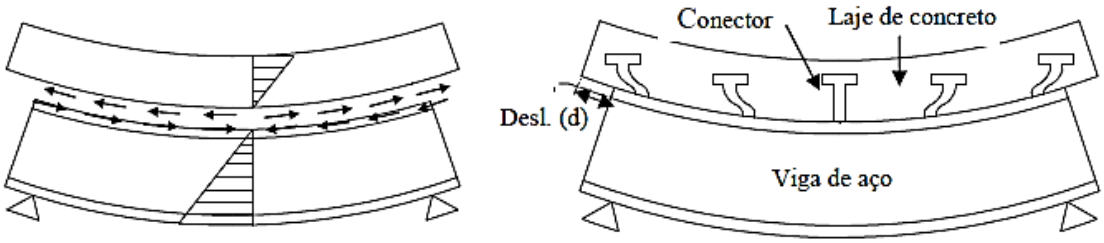
2.3.2. Ductilidade e Rigidez

A partir do ensaio *push-out* com a curva *Slip* x Carga a norma EN 1994-1-1:2004 permite caracterizar o conector de cisalhamento em estudo quanto à sua ductilidade (dúctil ou frágil) e rigidez (rígido ou flexível). O conector é classificado quanto à sua ductilidade com base do *slip* característico (δ_{uk}). Se o valor for superior a 6 mm, o conector é considerado dúctil; se for igual ou inferior, é considerado rígido (EN 1994-1-1:2004).

De acordo com Malite (1990), um conector de cisalhamento classificado como rígido apresenta deformação insignificante para carga de serviço, ou seja, apresenta baixo *slip*. Além disso, apresenta uma ruptura frágil, como é o caso do *stud bolt.* Por outro lado, o conector flexível apresenta um *slip* superior e ruptura dúctil.

Para o caso de uma viga mista biapoiada (Figura 9a) observa-se que os conectores não estão submetidos a um mesmo nível de solicitação. Na extremidade, há fluxo máximo

de cisalhamento, enquanto no centro do vão ele é nulo. Assim sendo, os conectores mais próximos dos apoios são os mais solicitados (Figura 9b).



(a) Fluxo de cisalhamento

(b) Deformação dos conectores ao longo da viga

Figura 9: Esforços ao longo da viga mista de aço e concreto (CAVALCANTE, 2010)

Quando se tem um conector dúctil, mesmo que ele alcance sua capacidade resistente, continua a deformar-se. Esse processo realiza a redistribuição de esforços aos demais conectores. Com isso, todos os conectores ficam submetidos a um mesmo nível de carga. De modo contrário, quando o conector é rígido, apresenta baixa deformação, o que impede a redistribuição de esforços e, consequentemente, cada conector está submetido a um nível de carga diferente.

Os conectores flexíveis, quando submetidos a esforços cíclicos, acabam sofrendo o efeito da fadiga. Para os conectores rígidos, por apresentarem baixas deformações, não sofrem os efeitos da fadiga. O conector *Perfobond* (Figura 2a), por exemplo, é um conector rígido e foi desenvolvido para ser aplicado vigas mistas de pontes, onde são submetidos a cargas cíclicas.

2.4. ENSAIO *PUSH-OUT*

A EN 1994-1-1:2004 estabelece as especificações e procedimentos do ensaio *push-out,* que tem como objetivo avaliar o comportamento dos conectores de cisalhamento. O espécime do ensaio consiste em duas lajes de concreto armado (600x650x150 mm) ligadas a um perfil metálico (HE 260 B ou 254 x 254 x 89 kg. UC) por 8 conectores de cisalhamento, que se deseja estudar, 4 em cada mesa e barras de reforço Φ 10 mm (Figura 10).

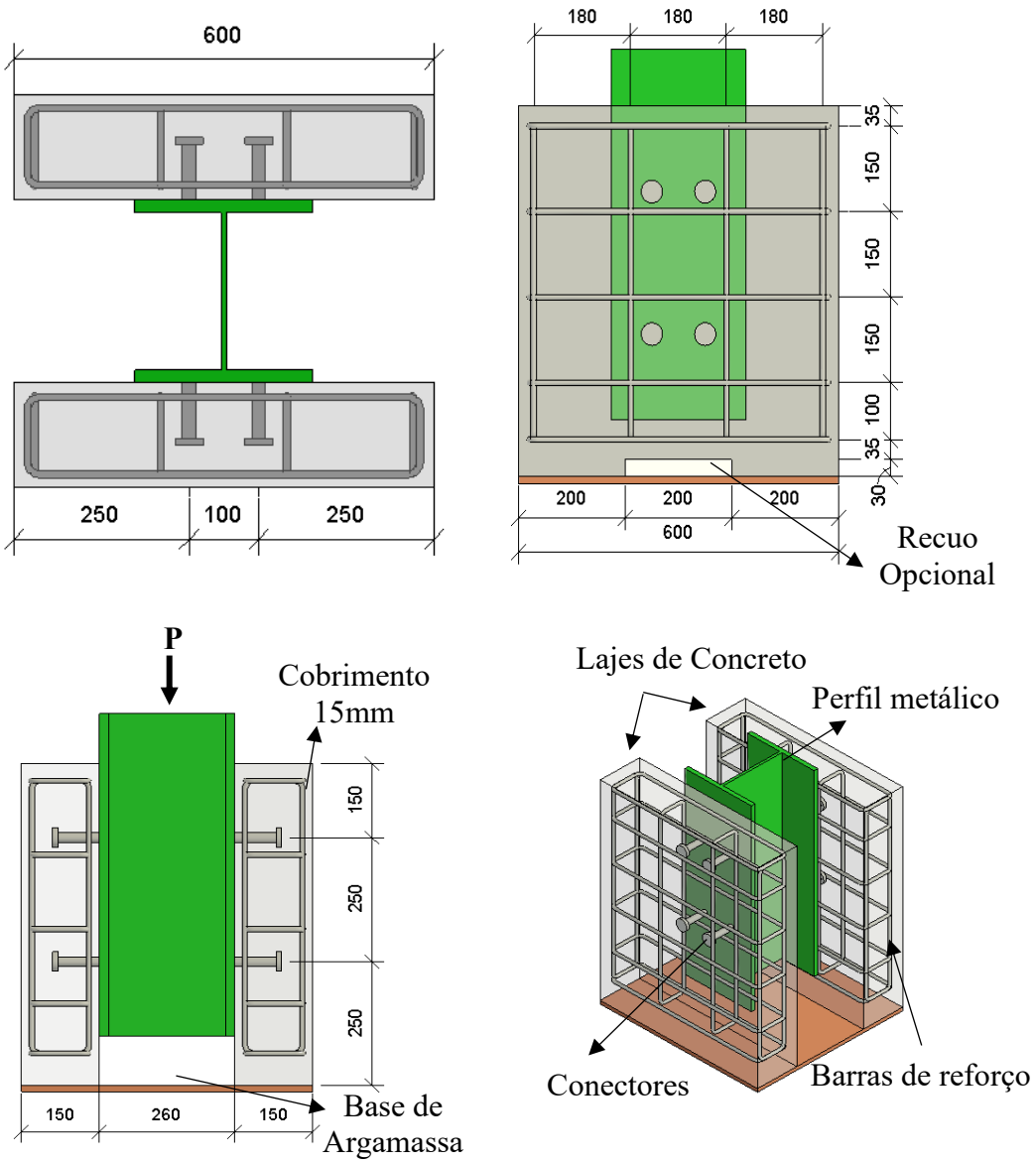


Figura 10: Ensaio *push-out* (modificado de EN 1994-1-1:2004) em mm

A execução do ensaio consiste em, inicialmente, aplicar uma carga de aproximadamente 40% da .carga de ruptura esperada, aplicada de maneira constante e lentamente. Após essa primeira aplicação, são realizados 25 ciclos de carga-descarga variando a carga entre 5% e 40%. Por fim, aplicam-se incrementos de carga até a ruptura, de forma lenta, garantindo que ela não ocorra em menos de 15 minutos.

P_{Rk} é a resistência característica do modelo, dada pela menor carga de ruptura entre os espécimes, minorada em 10%. Com esse valor, pode-se determinar a capacidade resistente (Figura 11). δ_u é a capacidade de *slip*, que é dada pelo deslizamento equivalente ao P_{Rk}. Por fim, a ductilidade é determinada ao minorar δ_u em 10%, obtendo-se o deslizamento característico δ_{uk}. O uplift é medido quando o espécime atinge 80% da

carga de ruptura, desde que não exceda 50% do slip correspondente a esse mesmo carregamento.

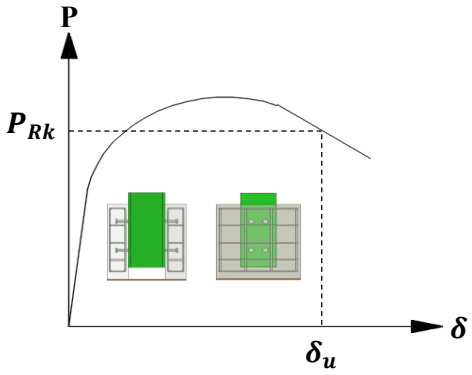


Figura 11: Determinação do *slip* (EN 1994-1-1:2004)

2.5. ESTADO DA ARTE: ESTUDOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS COM CONECTORES DE CISALHAMENTO

2.5.1. Conector stud bolt

Lam e El-Lobody (2005) estudaram o comportamento do conector de cisalhamento *stud bolt* em vigas mistas de aço e concreto, utilizando um modelo numérico tridimensional não linear desenvolvido no ABAQUS via MEF. Foram avaliados os valores de capacidade resistente, a relação *slip* x carga e modos de ruptura. O modelo foi validado com dados experimentais obtendo boa conformação entre os dados numérico e experimentais.

Nguyen e Kim (2009) desenvolveram um modelo numérico do ensaio *push-out* com conector *stud bolt* e investigaram a capacidade resistente. Após a validação do modelo, realizaram um estudo paramétrico, variando o diâmetro do conector e a resistência do concreto, avaliando a influência desses parâmetros na capacidade resistente e comportamento do conector.

Qureshi, Lam e Ye (2011) desenvolveram um estudo numérico via MEF sobre vigas mistas com laje com fôrma incorporada e conector *stud bolt*. Com o modelo validado, avaliaram a influência do espaçamento transversal entre os conectores e a resistência do concreto da laje na resistência da conexão. Concluindo que a resistência

dos *studs* duplos em uma posição favorável é geralmente maior do que a de pares escalonados de conectores de cisalhamento.

Bonilla *et al.* (2015) conduziram um estudo numérico, desenvolvido no *software* ABAQUS, do conector *stud bolt* em vigas mistas com laje maciça. A partir do modelo numérico, realizou-se um estudo comparativo com as formulações de diversas normativas, concluindo que, em sua maioria, as normas superestimam a capacidade resistente do conector

Yan *et al*. (2016) desenvolveram um modelo numérico tridimensional no ABAQUS para avaliar a capacidade resistente e o mecanismo de falha do conector *stud bolt*. O modelo foi validado com resultados experimentais e a partir dele foi desenvolvido um estudo paramétrico.

Ding *et al*. (2017) avaliaram experimentalmente 18 espécimes de ensaio *push-out* (6 diretos e 12 inversos). Com os resultados experimentais desenvolveram um modelo numérico no ABAQUS e a partir dele um estudo paramétrico. Foram estudadas a influência da resistência do concreto, resistência do conector, diâmetro e a relação comprimento-diâmetro no modo de falha, na capacidade resistente e na curva *slip* x carga do conector tipo *stud bolt*.

Bonilla *et al.* (2019) desenvolveram modelo numérico tridimensional não linear no *software* ABAQUS e estudaram o efeito da posição dos conectores *stud bolt* na nervura de lajes com fôrma incorporada. Perceberam que as normativas AASHTO LRFD:2004 e EN 1994-1-1:2004 a depender do caso subestimam ou superestimam a capacidade resistente do conector.

Vigneri *et al*. (2019) avaliaram a capacidade de carga do conector tipo *stud bolt* aplicado em vigas mistas com chapas de aço perfiladas com nervuras transversais. Na fase experimental o modo de falha do conector foi extensivamente avaliado. O modelo numérico desenvolvido no ABAQUS foi validado com os resultados experimentais e foi estudada a formação das rótulas plásticas ao longo do conector.

Chai *et al*. (2024) desenvolveram um estudo experimental e numérico do ensaio *push-out* com o conector *stud bolt*. Na fase experimental, ensaiaram 14 espécimes variando o tipo concreto (UHPC e NC), o diâmetro, o espaçamento vertical e o número de fileiras de conectores. Na fase numérica, após a validação do modelo desenvolvido no ABAQUS, avaliou-se: o diâmetro, a resistência à tração, o espaçamento vertical, o comprimento, a espessura da cobertura da cabeça e o espaçamento transversal dos conectores na capacidade resistente do grupo de *studs*.

GU *et al*. (2025) estudaram 23 espécimes de ensaio push-out com conector *stud bolt* e compostos cimentícios projetados – *engineered cementitious composites* (ECC). Foram avaliados os efeitos da direção do carregamento (momentos positivos e negativos), tipo de matriz do ECC, taxa de reforço, comprimento do pino e diâmetro e espessura da camada ECC. Os momentos negativos foram avaliados com o *push-out* invertido. Um modelo numérico tridimensional não linear foi desenvolvido no *software* ABAQUS simulando satisfatoriamente o ensaio experimental.

Numanović e Knobloch (2025) desenvolveram estudo numérico para avaliação da flambagem por cisalhamento em vigas mistas de aço e concreto com conector tipo *stud bolt*. O modelo numérico foi desenvolvido no ABAQUS e validado com resultados experimentais. Foram avaliados os parâmetros: esbeltez da alma, imperfeições iniciais e classes do concreto.

Diante dos estudos citados acima é possível perceber que o software ABAQUS é uma importante ferramenta para o estudo de conectores de cisalhamento. Mostrando-se eficaz na simulação numérica do ensaio *push-out* com o conector *stud*, inclusive com várias configurações, disposições e resistências de concreto. Ainda foram utilizados como referências para o desenvolvimento do modelo numérico do presente estudo.

2.5.2. Conectores alternativos

Leonhardt *et al.* (1987) desenvolveram um conector de cisalhamento rígido (Figura 12) para aplicação em vigas de pontes, a partir de uma barra de aço com furos circulares, soldado à viga metálica (KIM *et al*., 2016). Na primeira concepção o conector tinha 60 mm de altura, furos com 40 mm de diâmetro e uma espessura de 10mm. Os primeiros espécimes apresentavam ruptura no conector de cisalhamento, especificamente na região entre os furos (10 mm).

Por essa razão, foi estudada outra geometria, na qual a espessura foi aumentada para 12 mm, enquanto a altura e o diâmetro dos furos foram mantidos. Com essa nova configuração, o rompimento não ocorreu mais no conector, mas sim nos pinos de concreto, sob uma carga de 1870 kN.

Figura 12: Conector de cisalhamento *Perfobond* (KOTINDA, 2006)

Veldanda (1991) realizou um estudo experimental com 48 espécimes de ensaio *push-out*, comparando o conector *Perfobond* e o conector tipo *stud bolt*. A Figura 13 apresenta as quatro geometrias ensaiadas por Veldanda (1991). Observou-se que todas as geometrias ensaiadas apresentaram capacidade resistente superior à do conector *stud bolt*.

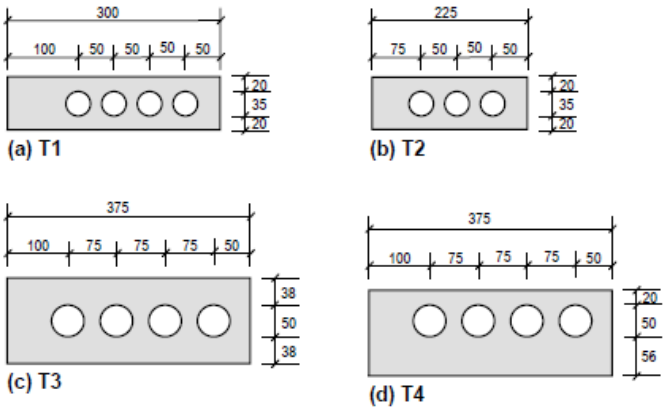
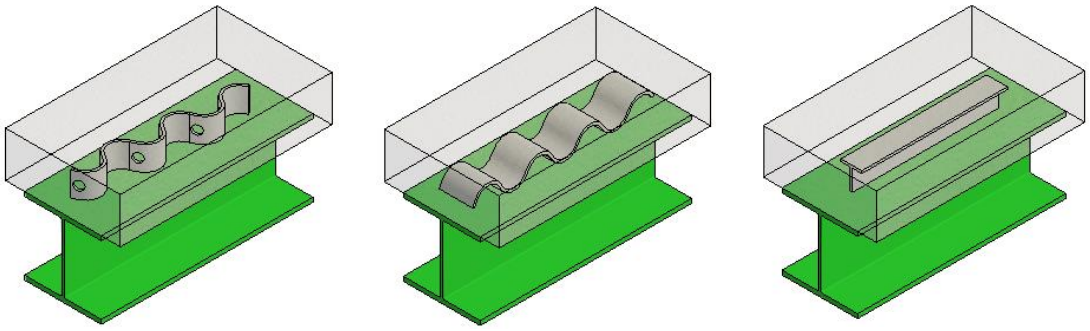


Figura 13: Características geométricas dos conectores *Perfobond* ensaiados por Veldanda (2010) (VERÍSSIMO, 2007 *apud* VELDANDA, 1991)

Galjaad e Walraven (2001) ensaiaram três tipos de conectores de cisalhamento alternativos: *Perfobond* sinuoso (Figura 14a), Tira ondulada (Figura 14b) e Perfil T (Figura 14c). O *Perfobond* sinuoso possui 100 mm de altura, 8 mm de espessura, 5 furos de 50 mm de diâmetro e uma onda e meia com amplitude de 110 mm. Ele foi fixado ao perfil por meio de solda com filetes de 5 mm em cada lado. As dimensões da tira ondulada são: largura de 50 mm, espessura de 6 mm e duas ondas com amplitude de 110 mm. As

dimensões do Perfil T são: 120 mm de altura, 300 mm de comprimento, fixado por dois filetes de solda de 6 mm.

O conector Perfil T apresenta maior ductilidade em relação ao *Perfobond* e resistência similar. Além disso, o *Perfobond* sinuoso apresentou capacidade resistente superior à do *Perfobond* convencional. Observou-se que os conectores apresentaram maior ductilidade em concretos menos densos do que em concretos mais densos.



(a) *Perfobond* sinuoso (Galjaad e Walraven, 2001) (b) Tira ondulada (Galjaad e Walraven, 2001) (c) Perfil T (Galjaad e Walraven, 2001)

Figura 14: Conectores alternativos ensaiados por Galjaad e Walraven (2001)

Veríssimo (2007) desenvolveu, a partir do *Perfobond,* o conector alternativo *Crestbond* (Figura 15). A fim de facilitar a passagem da armadura pelo conector, foram realizados furos abertos em formato de dentes. Foram testados 41 espécimes, como prescrito na EN 1994-1:2004. Observou-se um comportamento rígido no estado limite de serviço e dúctil para o ELU. Além disso, apresentou ainda flexibilidade superior à do *Perfobond.*

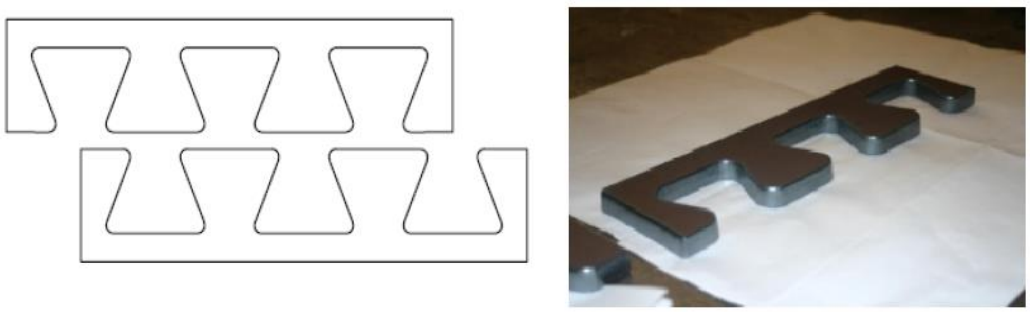


Figura 15: Conector de Cisalhamento *Crestbond* (VERÍSSIMO, 2007)

Cavalcante (2010) desenvolveu, na Universidade de Brasília, o conector "V" (Figura 16). Ele é formado a partir de uma série de cortes, dobras e soldagens do perfil

"U" (Figura 17). Ele foi estudado através de ensaios experimentais e modelos numéricos. Na fase experimental, foram ensaiados 16 espécimes do ensaio *push-out*.

Observou-se uma melhor distribuição de tensões no conector e na laje. O conector "V" possibilita a adoção de perfis com mesas menos espessas. Além disso, possibilita um menor nível de fissuração na laje, viabilizando o uso de concreto de menor resistência. Como também, apresentou menores valores de *uplift* e *slip* em relação ao *stud bolt*.

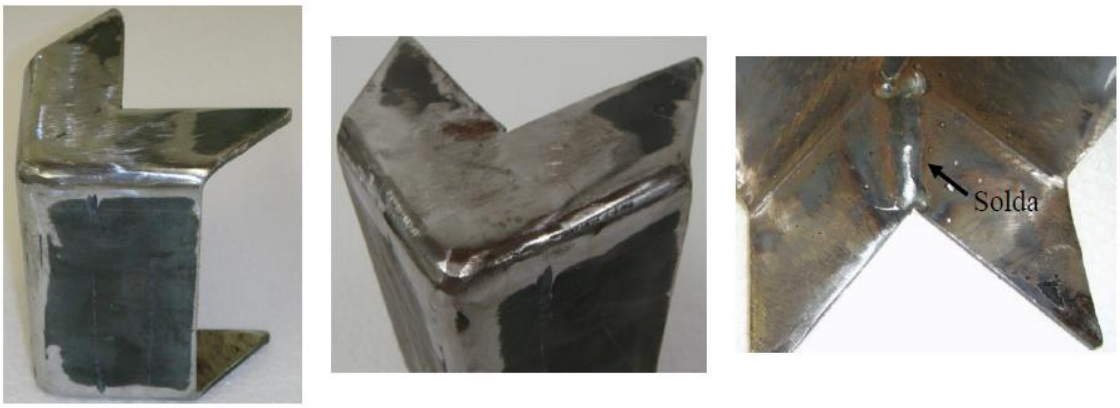
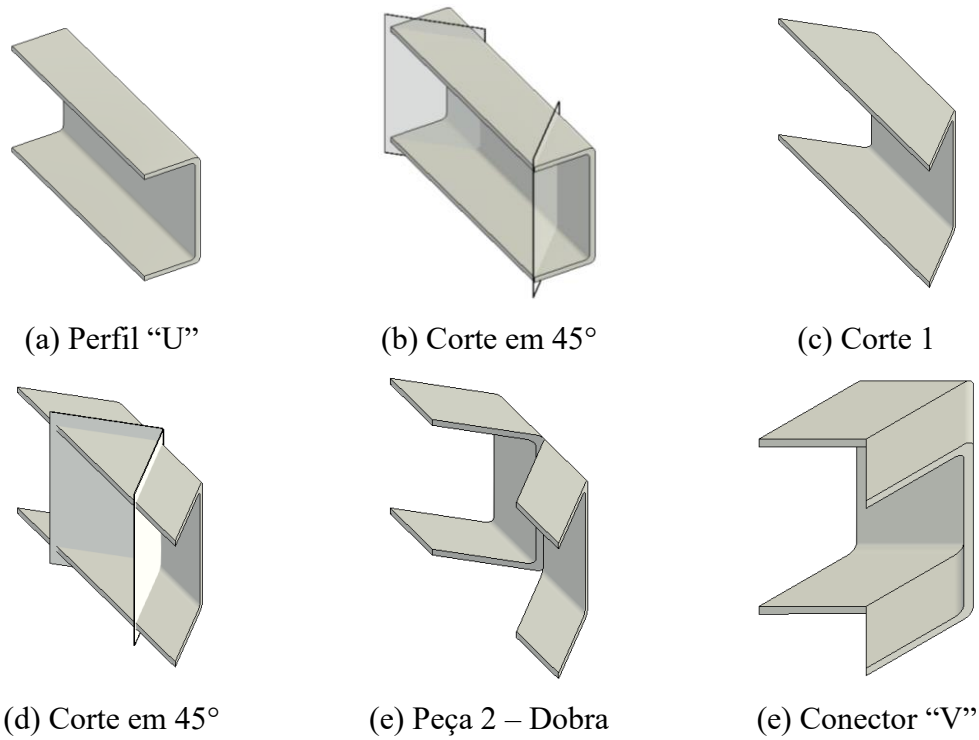


Figura 16: Conector "V" (CAVALCANTE, 2010)



(a) Perfil "U" (b) Corte em 45° (c) Corte 1

(d) Corte em 45° (e) Peça 2 – Dobra (e) Conector "V"

Figura 17: Processo de fabricação do Conector "V"

Shariati *et al*. (2016) propuseram um novo conector de cisalhamento (Figura 18) em forma de "V" angular. Foram realizados 14 ensaios *push-out* para cargas monotônicas e cíclicas. Com os resultados experimentais, foi validado um modelo numérico desenvolvido no ABAQUS. A partir do modelo numérico, foi desenvolvido um estudo paramétrico com esse conector.

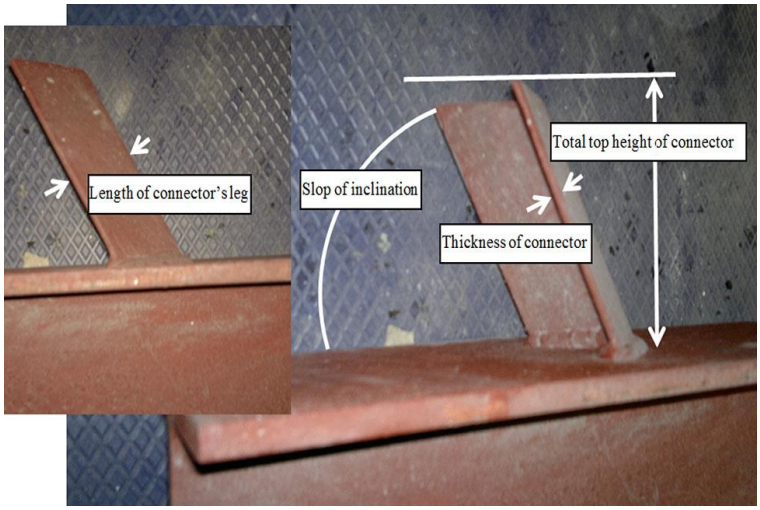


Figura 18: Conector em forma de "V" angular (SHARIATI *et al*., 2016)

Kim *et al*. (2017) desenvolveram estudo experimental e numérico com o conector tipo "Y" (Figura 19). Foi avaliado o comportamento à fadiga do conector, inicialmente sendo aplicados ciclos de carga e, posteriormente, a resistência residual sendo avaliada pelo *push-out*. Posteriormente, foi desenvolvido um modelo numérico no *software* ABAQUS para avaliar o comportamento desse conector em vigas mistas de pontes.

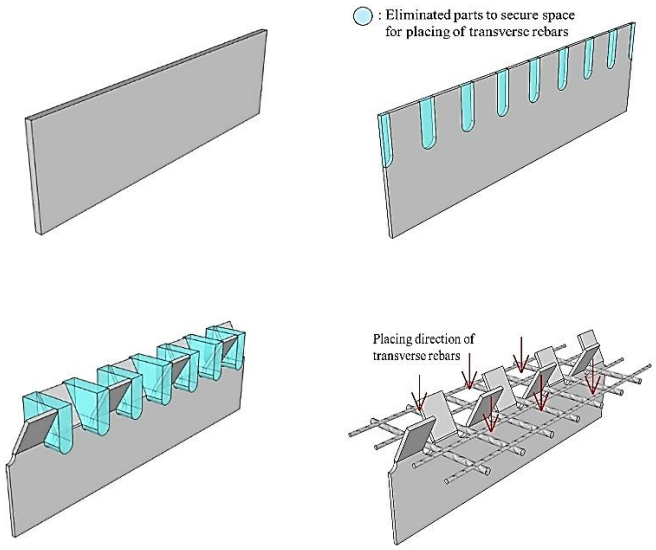


Figura 19: Conector tipo "Y" (KIM *et al*., 2017)

Lacki *et al*. (2019) realizaram um estudo experimental e numérico com o conector formado a partir do perfil *top-hat* (Figura 20). Na primeira fase, os 12 ensaios *push-out* foram executados, e o comprimento do conector otimizado. Os resultados experimentais foram verificados com um modelo numérico desenvolvido no ABAQUS. Por fim, foi realizado um estudo experimental e numérico de vigas mistas de teto.

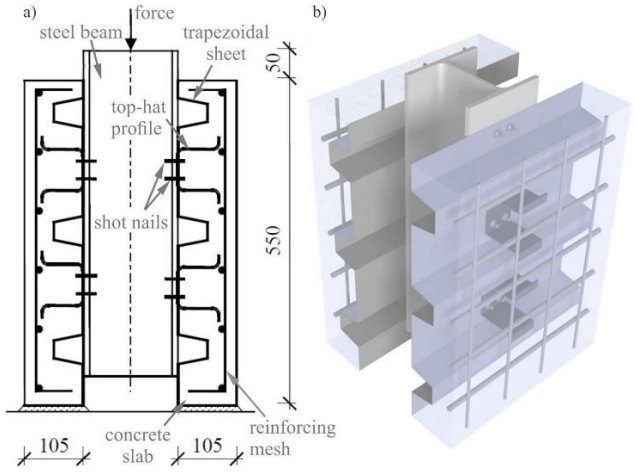


Figura 20: Conector formado a partir do perfil *top-hat* (LACKI *et al*., 2019)

Qiu *et al*. (2020) estudaram experimentalmente quatro tipos de conectores de cisalhamento formados a partir de aço laminado (Figura 21). O comportamento dos conectores foi avaliado a partir de 12 espécimes de *push-out,* que revelaram falha por compressão do concreto em todos os modelos.

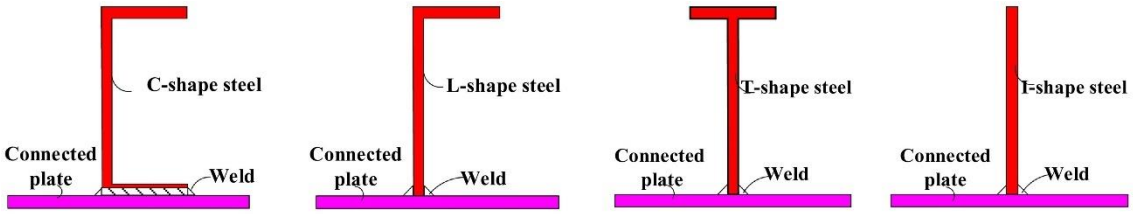


Figura 21: Conectores de cisalhamento formados a partir de aço laminado (QIU *et al*., 2020)

He *et al.* (2023) estudaram experimental e numericamente um conector híbrido, soldado-parafusado e desmontável (Figura 22). Ele foi avaliado com relação à fadiga de alto ciclo. Observou-se que o principal modo de falha ocorre por rompimento na base do conector. A partir do programa experimental, foi desenvolvido modelo numérico no ABAQUS e, após um estudo paramétrico, construiu-se a curva de Whöler para previsão de fadiga com e sem argamassa.

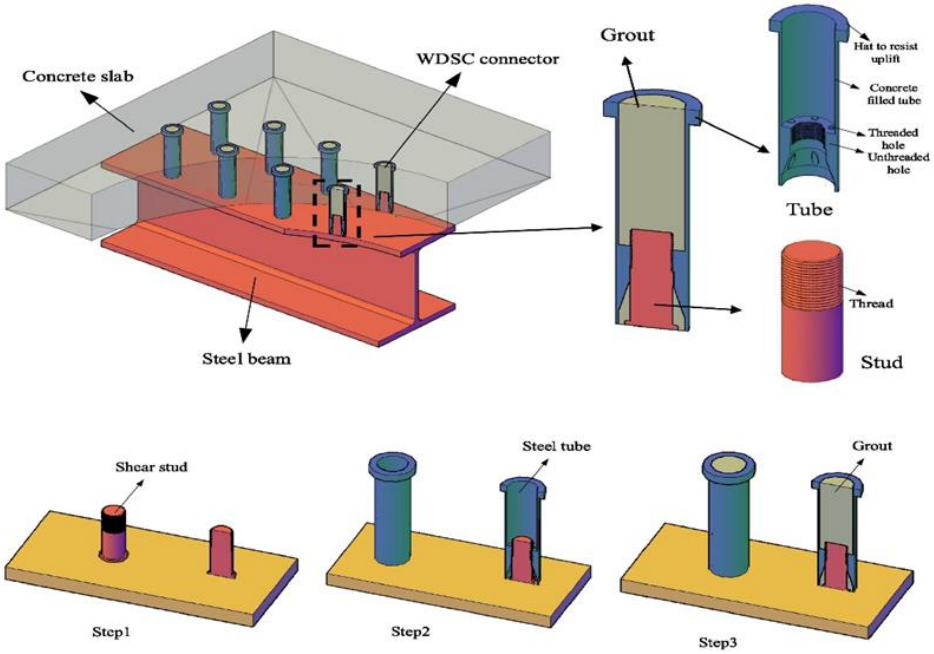


Figura 22: Conector híbrido desmontável (HE *et al*., 2023)

Ainda Bezerra *et al.,* (2018-b) desenvolveram um modelo numérico do ensaio *push-out* com o conector "V" e validaram seu modelo com os resultados experimentais de Cavalcante (2010). Foi desenvolvido um estudo paramétrico que possibilitou a proposição de uma formulação para o cálculo da capacidade resistente do conector.

De modo semelhante ao apresentado no item 2.5.1, o software ABAQUS mostrou-se eficiente na simulação do ensaio *push-out* com conectores alternativos. Os estudos citados serviram para todo o processo de construção do modelo numérico desse estudo. Processo de calibração do modelo, modelos constitutivos do aço e do concreto, aplicação de carga foram os principais aspectos metodológicos usados nesse trabalho.

2.5.3. Conector de Cisalhamento treliçado

Os trabalhos apresentados a seguir tratam exclusivamente do CT. Inicialmente sua concepção com Barbosa (2016) estabelecendo os resultados experimentais que serviram de calibração para todos os estudos numéricos posteriores. Lima (2020), Lima (2022) e Moura (2024) desenvolvendo estudos paramétricos numéricos, tendo Lima (2020) proposto uma equação para a capacidade resistente do CT isósceles. E Moura (2022) e Lima (2024) desenvolvendo estudo numérico e experimental, respectivamente, com vigas mistas de aço e concreto com CT isósceles.

O conector de cisalhamento treliçado (CT) foi desenvolvido por Barbosa (2016), que o estudou numérica e experimentalmente. Após a idealização do conector, um modelo foi desenvolvido no *software* ANSYS. Posteriormente, foram executados ensaios *push-out* com o CT. Ao todo, foram ensaiados 24 espécimes com o CT e o *stud bolt*. Esse estudo será abordado com maior profundidade no item a seguir.

Em seguida, Lima (2020) desenvolveu um estudo numérico do ensaio *push-out* com o CT. O modelo numérico tridimensional não linear foi desenvolvido via MEF no ABAQUS. Com o modelo validado, foi empreendido extenso estudo paramétrico (aspectos geométricos e resistência do concreto), e, com base nos resultados foi proposta uma equação para o cálculo da capacidade resistente do CT isósceles.

Moura (2022) desenvolveu um estudo numérico de vigas mistas com o CT isósceles. Inicialmente, foi desenvolvido no ABAQUS um modelo numérico do ensaio *push-out* de Barbosa (2016). Após a validação com modelo numérico a mesma metodologia foi aplicada em modelos numéricas de vigas mistas com CT. A capacidade resistente dos CTs foi calculada pela equação de Lima (2018), e observou-se que o comportamento das vigas foi coerente com a literatura. Foram estudados cinco modelos de vigas com variando graus de conexão.

Lima (2022) desenvolveu, no ABAQUS, um estudo numérico com o CT de ângulo reto, validando seus dados com Barbosa (2016). Após a validação do modelo, foi

realizado um estudo da influência da orientação do conector na capacidade resistente. Percebeu-se que, ao inverter a orientação com relação ao estudo de Barbosa (2016), houve um aumento de 17,86% na capacidade resistente. Após essa constatação, foi realizado um estudo paramétrico e proposta uma formulação para o cálculo da capacidade resistente do CT de ângulo reto.

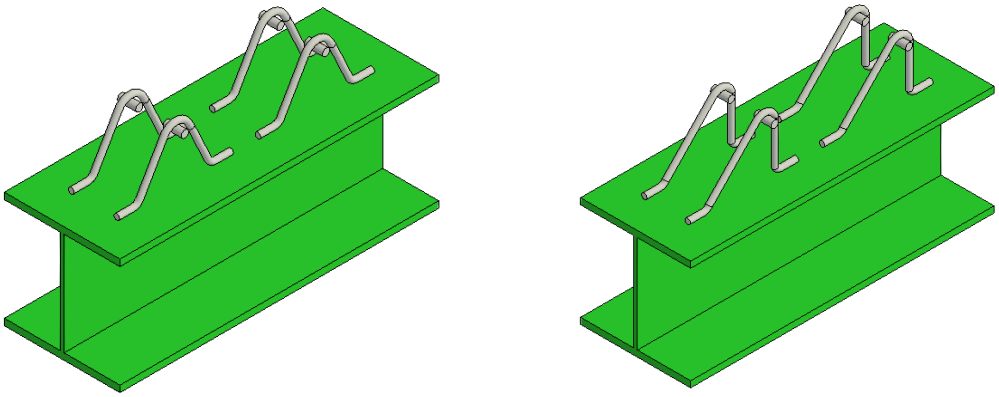
Lima (2024) realizou um estudo experimental de vigas mistas com o CT isósceles. Foram ensaiadas três vigas em tamanho real com diferentes graus de conexão. O autor observou que o *uplift* ficou de acordo com o Eurocode-4. Além disso, foi observado que a diminuição do grau de conexão gera um maior *slip*.

Moura *et al*., (2024) desenvolveram um modelo numérico tridimensional não linear do ensaio *push-out* com CT. Com a validação do modelo, foi estudada a influência do ângulo de abertura, da resistência do concreto e da altura do conector na capacidade resistente do conector. O modelo foi elaborado discretizando o CT com elemento de barra, o que gerou um ganho significativo no custo computacional, sem, contudo, perder a qualidade da simulação do ensaio *push-out*.

O presente estuda busca contribuir nessa linha de pesquisa, de quase 10 anos, desenvolvendo um modelo numérico de baixo custo computacional e, a partir de um estudo paramétrico, propor uma equação mais geral do que a apresentada por Lima (2020).

2.6. PROGRAMA EXPERIMENTAL BARBOSA (2016)

Barbosa (2016) desenvolveu na Universidade de Brasília o conector de cisalhamento treliçado (Figura 23). Foram realizados estudos numéricos e experimentais com o conector alternativo. O conector treliçado possui dois formatos padrão: triangular isósceles (Figura 23a) e triangular reto (Figura 23b). Esses modelos estão registrados no INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial, com os números de registro BR302016002949-0 e BR1020160090156, respectivamente.



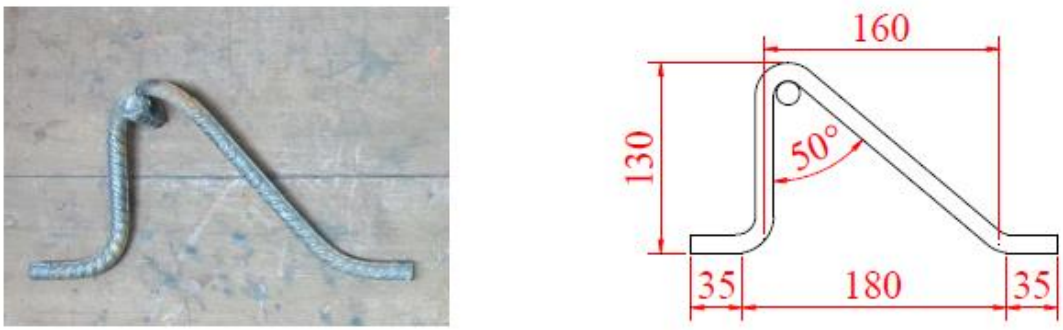
(a) CT Isósceles (b) CT Reto

Figura 23: Conector Treliçado (BARBOSA, 2016)

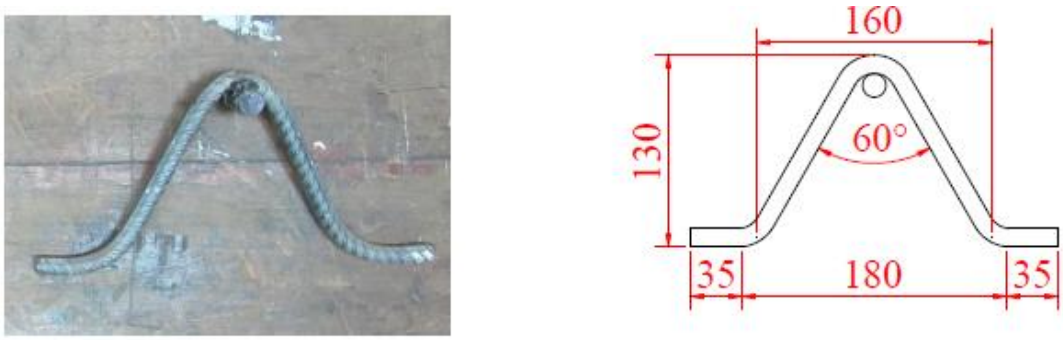
Segundo Barbosa (2016), os conectores treliçados apresentam as seguintes vantagens quando comparados com os conectores *stud bolt* e "U":

- Altos valores de carga resistente em relação ao *stud bolt*;
- Bom comportamento quanto aos deslizamentos longitudinais, e ao *uplift*;
- O material que o constitui (aço CA50) é facilmente encontrado no mercado da construção civil;
- Processo de fabricação e instalação simples;
- A solda pode ser executada com eletrodos e máquinas comuns;
- Geometria adequada para sistemas com pré-lajes de concreto pré-moldado e lajes com fôrma de aço incorporada.

O conector treliçado reto (Figura 24a) possui uma haste ortogonal e outra inclinada com um ângulo de 50º, enquanto o conector treliçado isósceles (Figura 24b) possui uma barra dobrada com duas hastes inclinadas em um ângulo de 60º. Ambos possuem hastes horizontais para fixação por solda ao perfil de aço. Os conectores possuem uma barra de 40 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro no vértice superior para combater o *uplift*, similar à "cabeça" do *stud bolt*.



(a) Conector de Cisalhamento Treliçado Reto



(b) Conector de Cisalhamento Treliçado Isósceles

Figura 24: Conector de Cisalhamento Treliçado

Barbosa (2016) realizou 24 ensaios push-out, sendo 3 com *stud bolt* (19,0 mm) como valores de referência e 21 com conectores treliçados isósceles e retos, com diâmetros de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. O conector treliçado isósceles de 12,5 mm mostrou a maior resistência (104,50 kN), seguido pelo reto de 12,5 mm (87,50 kN) e pelo *stud bolt* (62,45 kN). Todos os conectores foram classificados como dúcteis de acordo com a EN 1994-1-1:2004. O conector isósceles de 12,5 mm apresentou *uplift* de 0,47 mm, próximo ao *stud bolt* com 0,42 mm.

O ensaio push-out foi desenvolvido a partir do que preconiza a EN 1994-1-1:2004. Na Figura 25, são apresentados os aspectos geométricos do ensaio experimental de Barbosa (2016), que foram usados para a construção do modelo numérico desenvolvido nesse trabalho.

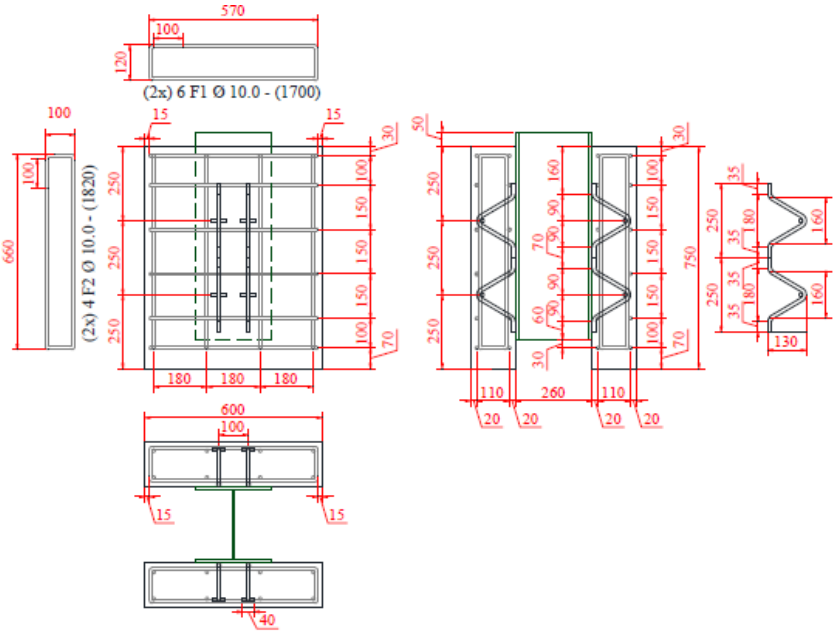


Figura 25: Geometria do ensaio experimental de Barbosa (2016)

As Figuras 26 a 28 apresentam as curvas Deslocamento x Carga do CT isósceles para os diâmetros 8 mm, 10 mm e 12,5mm, respectivamente. Esses gráficos foram usados para a calibração dos modelos numéricos.

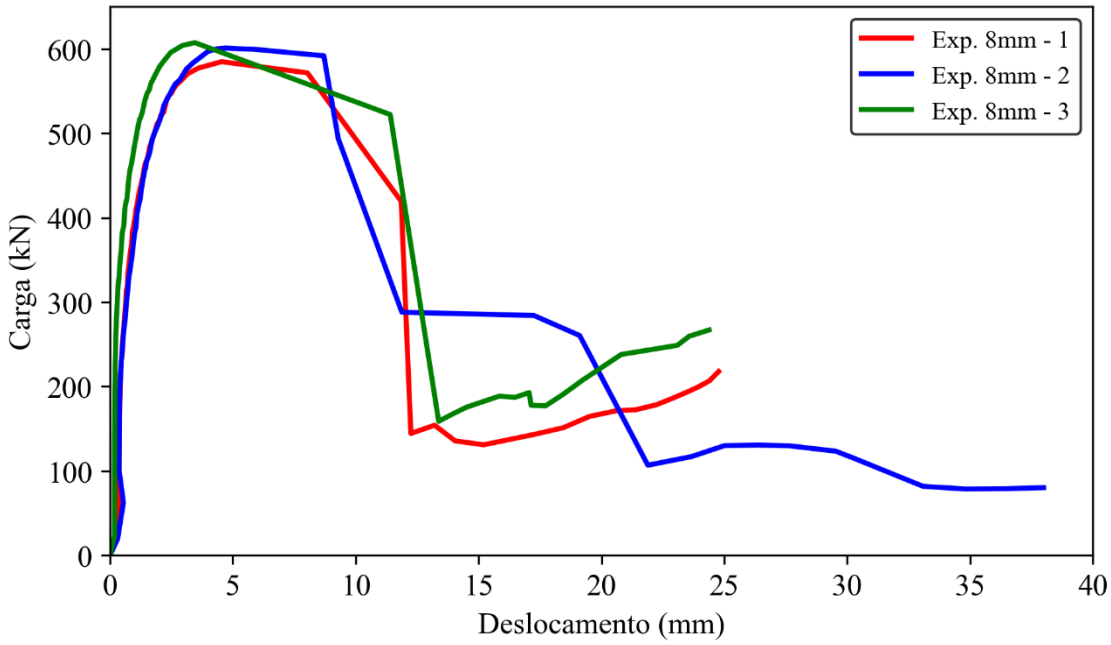


Figura 26: Curva Carga x Deslocamento – CT Isósceles 8mm (adaptado de Barbosa 2016)

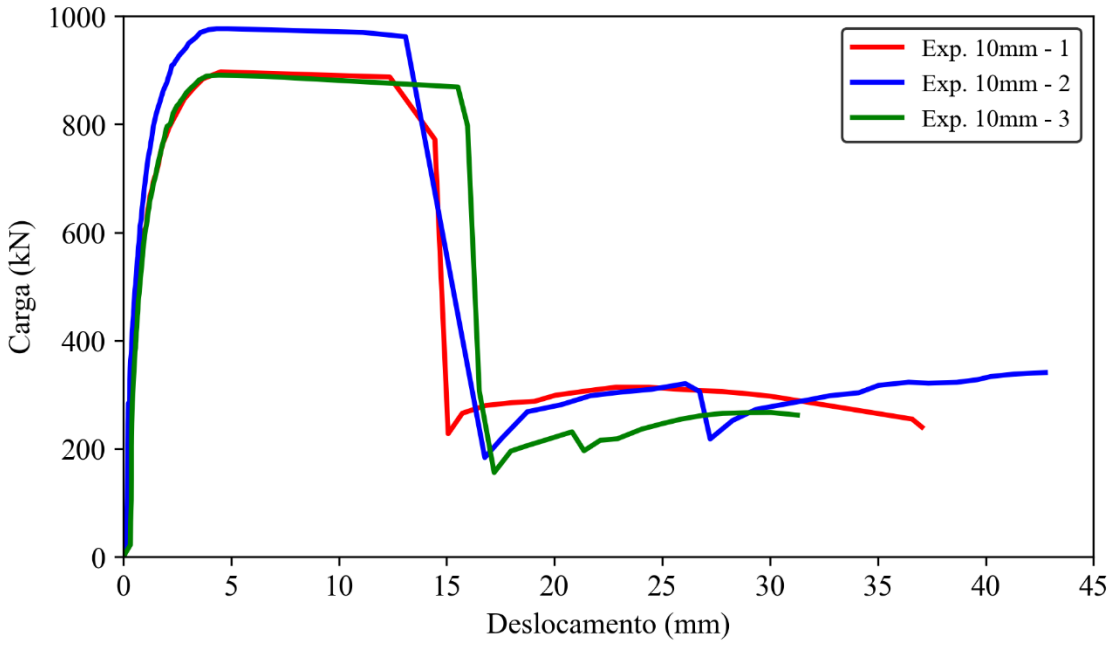


Figura 27: Curva Carga x Deslocamento – CT Isósceles 10mm (adaptado de Barbosa 2016)

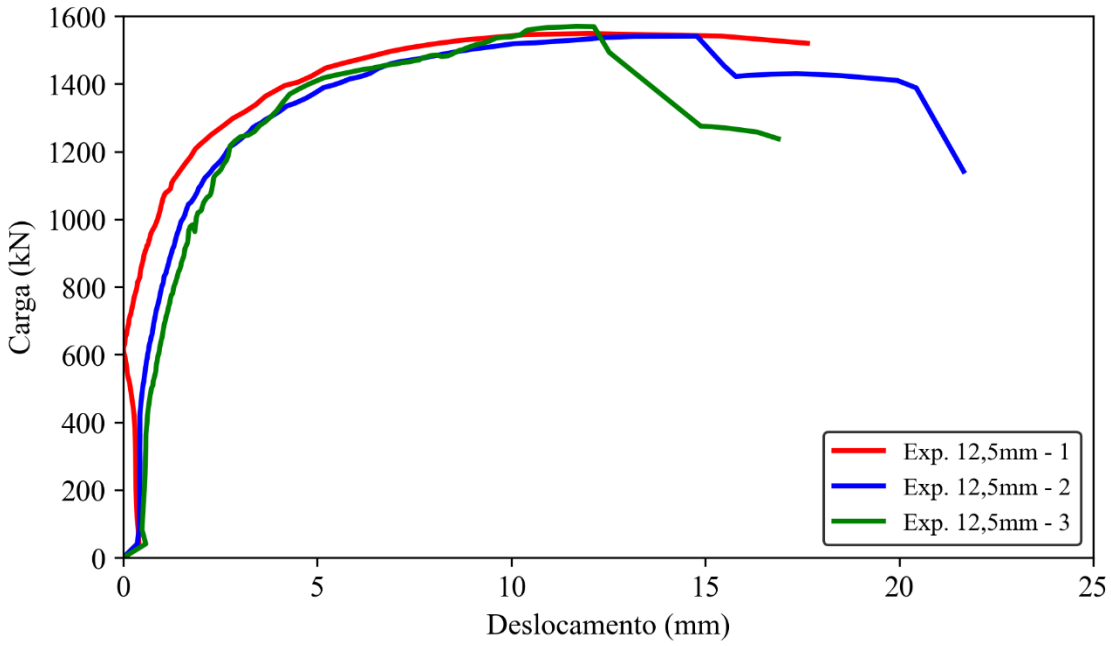


Figura 28: Curva Carga x Deslocament – CT Isósceles 12,5mm (adaptado de Barbosa 2016)

2.7. MODELAGEM NUMÉRICA DE LIMA (2018)

Lima (2018) desenvolveu um modelo numérico tridimensional não linear para simular o ensaio push-out com conector de cisalhamento treliçado, validando-o como os dados experimentais de Barbosa (2016). Em seu estudo, o autor discretizou o conector de cisalhamento treliçado utilizando elementos sólidos tridimensionais, considerando as hastes horizontais para soldagem e um pino de 16 mm que simula a cabeça do *stud bolt* (Figura 29). Na Figura 29 está ilustrada a malha e os elementos finitos utilizados pelo autor.

O modelo desenvolvido é bastante complexo, considerando as não-linearidades dos materiais, interações e contatos. Além disso, a discretização do conector treliçado com elemento tridimensional sólido gera um maior número de nós e, consequentemente um custo computacional elevado. O tempo de processamento do modelo chegou a aproximadamente 19 h (LIMA, 2018). O modelo segue a geometria, as propriedades dos materiais e as características dos espécimes de Barbosa (2016).

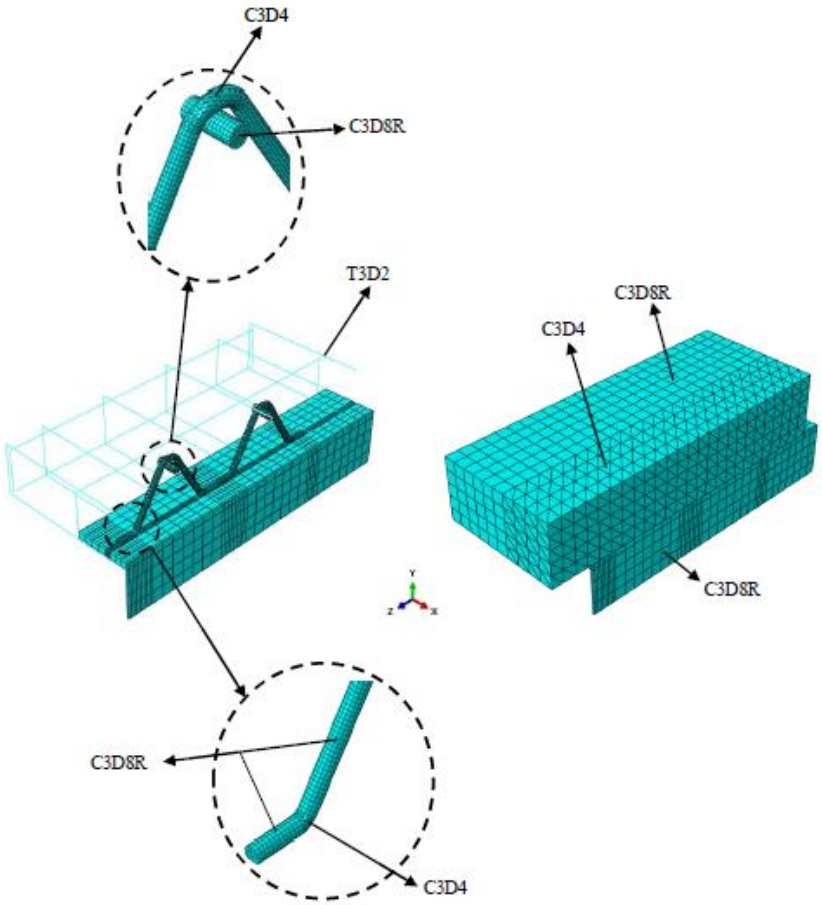


Figura 29: Elementos finitos Lima (2018)

A Figuras 30, 31 e 32 apresentam as curvas carga x deslocamento obtidas por Lima (2018) e validadas pelas experimentais de Barbosa (2016). O modelo do autor foi capaz de simular com precisão o ensaio *push-out* desenvolvido. É possível perceber que o modelo numérico de Lima (2018) obteve curvas carga x deslocamento que se adequam bem às curvas experimentais.

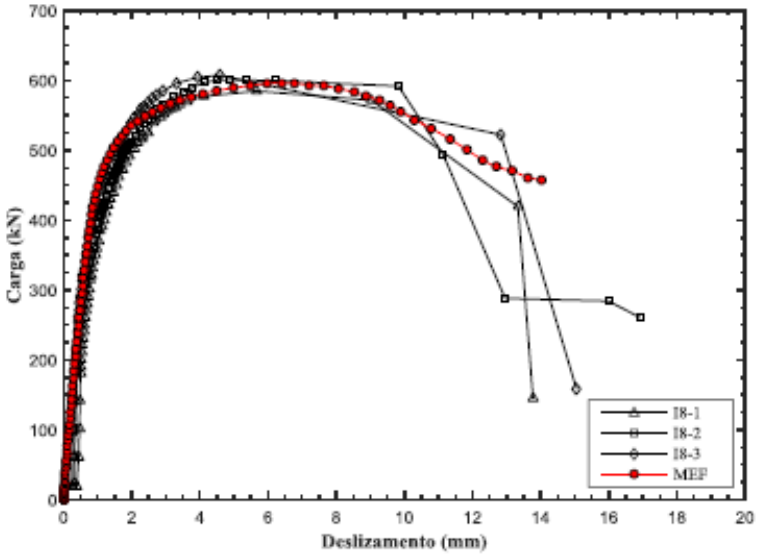


Figura 30: Curvas carga-deslizamento para o modelo I8 (LIMA, 2018)

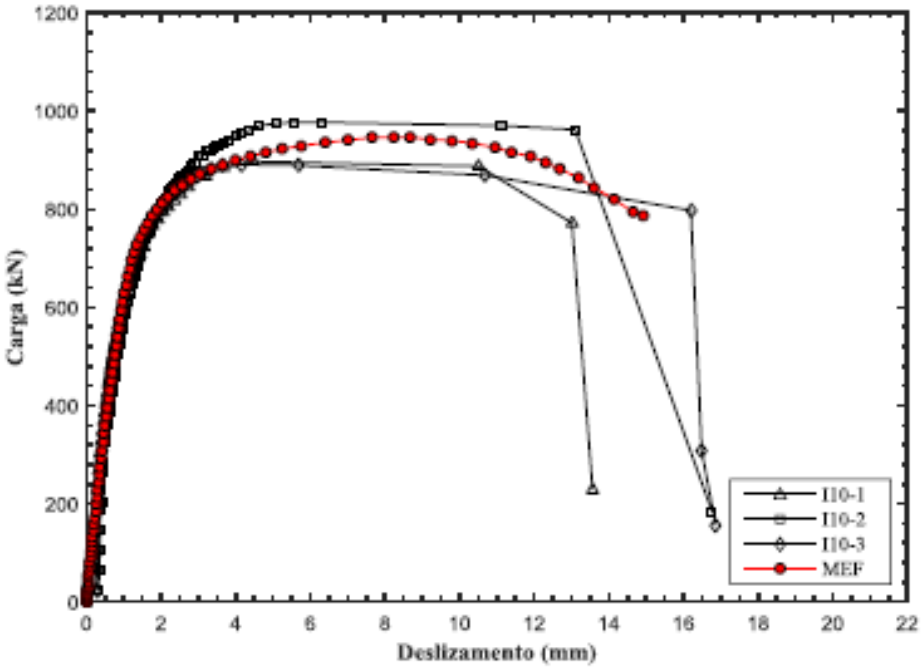


Figura 31: Curvas carga-deslizamento para o modelo I-10 (LIMA, 2018)

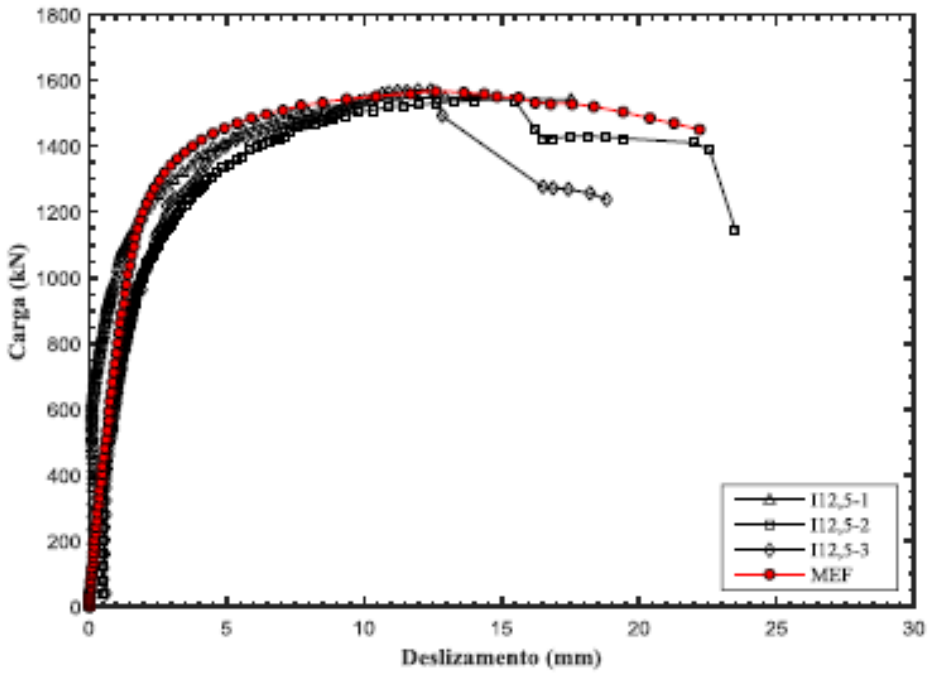


Figura 32: Curvas carga-deslizamento para o modelo I12,5 (LIMA, 2018)

Com relação a capacidade resistente, o modelo numérico de Lima (2018) também apresentou valores próximos aos obtidos experimentalmente. O maior erro entre as capacidades resistentes experimentais e numéricas foi de 5,80%. Isso demonstra que o modelo foi capaz de simular com precisão o ensaio *push-out* com o conector de cisalhamento treliçado.

Lima (2018), ainda desenvolveu estudo paramétrico com o objetivo de determinar uma equação para o cálculo da capacidade resistente do CT. Foram estudados os seguintes parâmetros: ângulo de abertura, altura e resistência do concreto. Ao fim do estudo, foi obtida a Eq. 6 para conector com altura de 90 mm e ângulo de abertura entre as hastes de 80°, quando aplicado em vigas mistas de aço-concreto com laje maciça.

$$Q_{CT} = 0{,}695 A_{CT} \sqrt{f_{cm} E_0} \tag{6}$$

Onde:

Q_{CT} é a capacidade resistente do conector de cisalhamento treliçado (kN);

A_{CT} é a soma das áreas da seção transversal das duas hastes do conector de cisalhamento treliçado (m²);

f_{cm} é a resistência à compressão do concreto (MPa);

E_0 é o módulo de elasticidade secante do concreto (MPa).

2.8. *MACHINE LEARNING* E REDES NEURAIS APLICADOS À REGRESSÃO LINEAR

Machine Learning (ML) é uma subárea da inteligência artificial que permite aos computadores adquirirem a habilidade de aprender a partir de dados, sem precisarem ser explicitamente programados. Algoritmos são desenvolvidos para que o computador analise os dados e identifique padrões (SILVA *et al.*, 2023).

O processo de aprendizagem permite ao computador melhorar seu desempenho em tarefas específicas quanto mais experiência acumule. Algoritmos de ML são aplicados em plataformas de músicas e vídeos, que ao aprender a preferência dos usuários sugerem conteúdos que, provavelmente, estarão alinhados com essas preferências (GÉRON, 2019).

No escopo da engenharia civil técnicas de ML são aplicadas às mais diversas áreas. Por exemplo, MOEIN *et al*. (2023) desenvolveram um trabalho de revisão sobre aplicação de ML e *deep learning* à predição de propriedades do concreto (resistência à compressão e tração) e módulo de elasticidade.

Em pesquisa realizada pelo autor no *ScienceDirect* pelo termo *machine learning* e filtrando os resultados para engenharia obtiveram-se mais de 2000 artigos publicados aplicando ML à engenharia civil. Predição de comportamento de rochas, comportamento estrutural sob cargas monotônicas e cíclicas, entre muitos outros temas, foram encontrados. Isso evidencia a potência do ML e sua aplicabilidade na engenharia.

Há três formas de ML: aprendizado supervisionado, não supervisionado e por reforço. No aprendizado supervisionado, o modelo é treinado com dados rotulados, ou seja, dados nos quais as respostas corretas já são conhecidas. No não supervisionado é o oposto, o modelo é treinado com dados não rotulados e nesse caso o modelo busca padrões. Por fim, no por reforço, o modelo aprende por meio de interações contínuas com o ambiente (GÉRON, 2019).

Dentro do aprendizado supervisionado os problemas mais comuns são: classificação e regressão. Na classificação o objetivo é prever uma categoria ou classe, por exemplo identificar e-mails como "*spam*". Já nos problemas de regressão, o objetivo é prever um valor contínuo, como, por exemplo, a temperatura em determinada data (BISHOP, 2006).

O funcionamento do ML com aprendizados supervisionado consiste em duas etapas: treinamento e teste/validação. Do banco de dados fornecido, uma parte é separada

como dados de treinamento. Esses dados são utilizados pelo modelo para "aprender" a relação entre entradas e saídas e melhorar a predição através de ajuste de parâmetros internos (BISHOP, 2006).

Já o grupo de teste/validação é usado após o processo de treinamento para avaliar o quão precisa está a predição do modelo. Para problemas de regressão, são utilizadas as seguintes medidas para avaliar a eficiência da previsão: Erro Quadrático Médio (MSE - *Mean Squared Error*), que mede a média dos quadrados das diferenças entre os valores reais e as previsões (GÉRON, 2019).

O Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE - *Root Mean Squared Error*) é a raiz quadrada do MSE e é útil porque está na mesma unidade dos dados. Outra métrica importante é o Erro Absoluto Médio (MAE - *Mean Absolute Error*), que calcula a média das diferenças absolutas entre as previsões e os valores reais, fornecendo uma medida direta da magnitude do erro. O Coeficiente de Determinação (R^2 - R-*squared*) é uma métrica que indica quanto da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo, sendo útil para entender a qualidade do ajuste.

O Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE - *Mean Absolute Percentage Error*) mede o erro em termos percentuais, permitindo interpretar o desempenho do modelo em uma escala relativa. Por fim, o Erro Médio Percentual (MPE - *Mean Percentage Error*) calcula a média dos erros percentuais, podendo ser útil, embora sensível a valores próximos de zero.

Para a realização de regressão linear simples ou múltiplas alguns algoritmos de ML são propostos. Entre os eles o *scikit-learn*, que é um algoritmo simples e eficiente que utiliza a classe *LinearRegression* na qual se calibra os coeficientes das variáveis independentes que minimizam a soma dos erros quadrados. *Statsmodels* fornece uma implementação mais estatística da regressão linear, permitindo calcular métricas de avaliação adicionais, como, por exemplo, o R^2.

Há ainda maneiras de utilizar redes neurais para o cálculo da regressão, como é o caso das bibliotecas *tensorFlow* ou *Keras*. Embora a atividade de regressão consiga ser realizada de maneira mais simples, em problemas complexos pode ser necessário a utilização de redes neurais. Em casos em que a relação entre as variáveis não é linear.

Uma rede neural é um modelo computacional que busca simular o funcionamento do cérebro humano. Ela é estruturada em neurônios e camadas. Estas podem ser de: entrada, o *input* dos dados de entrada, ocultas, onde é realizado o processamento e saída, o *output*, ou seja, os dados de saída, uma imagem, uma regressão.

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO

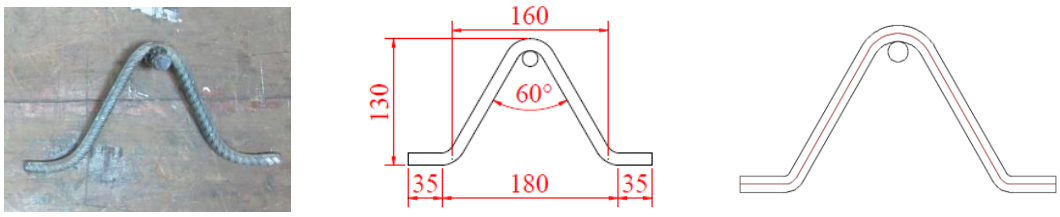
Nessa seção serão apresentados os aspectos do modelo numérico não linear tridimensional do ensaio *push-out* com CT. O modelo numérico foi desenvolvido no *software* ABAQUS 2021 via MEF. Na Tabela 1, estão as unidades utilizadas no desenvolvimento deste modelo, uma vez que o ABAQUS não possui um sistema de unidades pré-definidas.

Tabela 1: Sistema de Unidades adotada

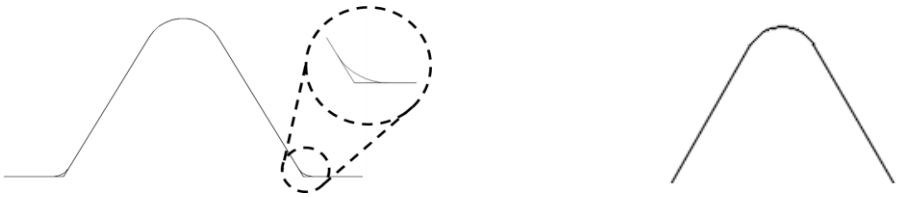
Unidades		
Comprimentos	**Carregamentos**	**Tensão/Pressão**
mm	N	MPa

3.1. IDEALIZAÇÃO DO CONECTOR COM ELEMENTO DE BARRA 3D

Nesse estudo, o CT isósceles é discretizado como elemento de barra 3D. Essa consideração exigiu uma etapa preliminar: a definição da discretização do conector. Foi tomado o conector como ensaiado por Barbosa (2016) (Figura 33a) e modelado com elemento sólido por Lima (2018). A partir dele foi tomada a linha central da geometria (Figura 33c) e realizados ajustes na base das hastes (Figura 33d), conservando o ângulo de abertura e o raio do modelo original. Desse modo, foi idealizada a discretização do conector (Figura 33e).



(a) CT experimental (b) Dimensões do CT (c) Linha média do CT

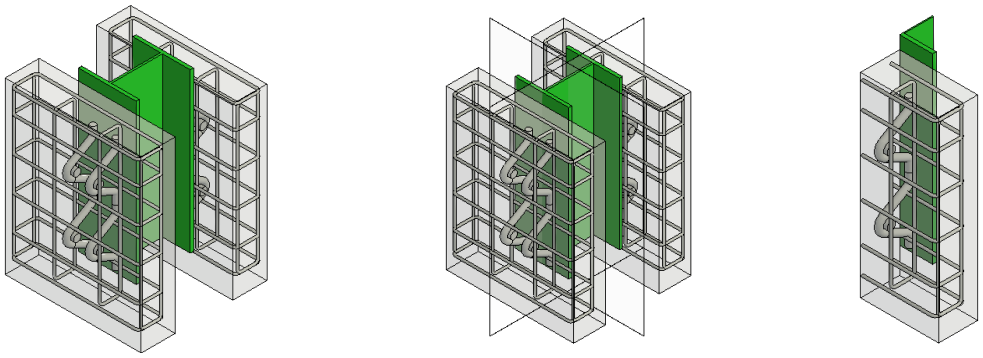


(d) Ajuste na base da haste do CT (e) CT numérico idealizado

Figura 33: Idealização do CT com elemento de barra 3D

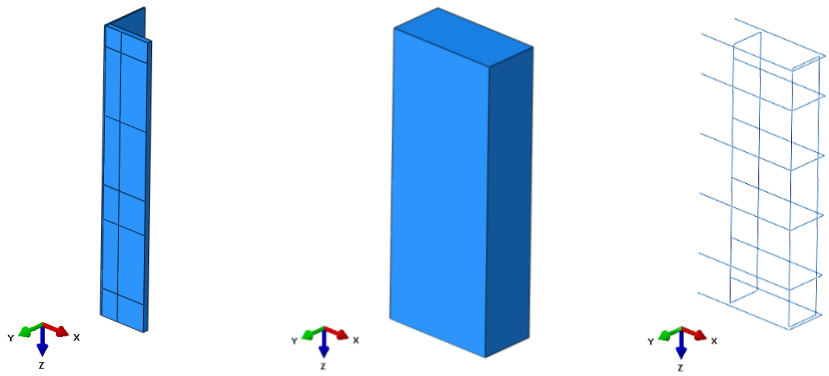
3.2. ASPECTOS GEOMÉTRICOS

Os espécimes de Barbosa (2016) são formados por um perfil metálico, uma laje de concreto, oito conectores de cisalhamento (quatro em cada mesa do perfil) e armadura de reforço. A fim de reduzir o custo computacional, o modelo numérico desenvolvido nesse trabalho contempla ¼ do modelo experimental (Figura 34), garantindo a integridade dos resultados através de condições de contorno impostas. Na Figura 35, são apresentadas as partes constituintes do modelo numérico.

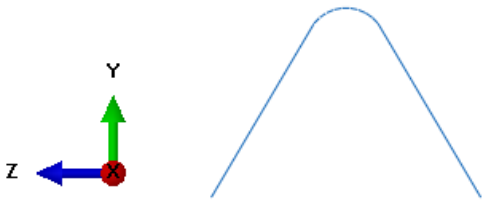


(a) Push-out experimental (b) Planos de simetria (c) ¼ do Modelo

Figura 34: Redução do espécime experimental



(a) Perfil Metálico (b) Laje de Concreto (c) Armadura



(d) Conector

Figura 35: Partes constituintes do modelo numérico

O perfil metálico (Figura 35a) e a laje de concreto (Figura 35b) foram modelados por meio de extrusão. A laje tem dimensões 300 mm x150 mm x 750 mm e as dimensões do perfil consideram ¼ da seção transversal do perfil W250x73, usado por Barbosa (2016), e comprimento de 700 mm.

Os conectores de cisalhamento (Figura 35d) e as armaduras de reforço (Figura 35c) foram construídos a partir do comando *wire*. No caso do conector, foi desconsiderado o pino 16mm na curvatura do modelo (Figura 33) bem como as hastes horizontais que são soldadas ao perfil a fim de simplificar o modelo. As armaduras foram modeladas de acordo com o apresentado por Barbosa (2016) (Figura 25). Na Figura 36, é apresentado o modelo que foi simulado numericamente. Ele é composto de um perfil metálico, uma laje de concreto, dois CTs e armadura de reforço.

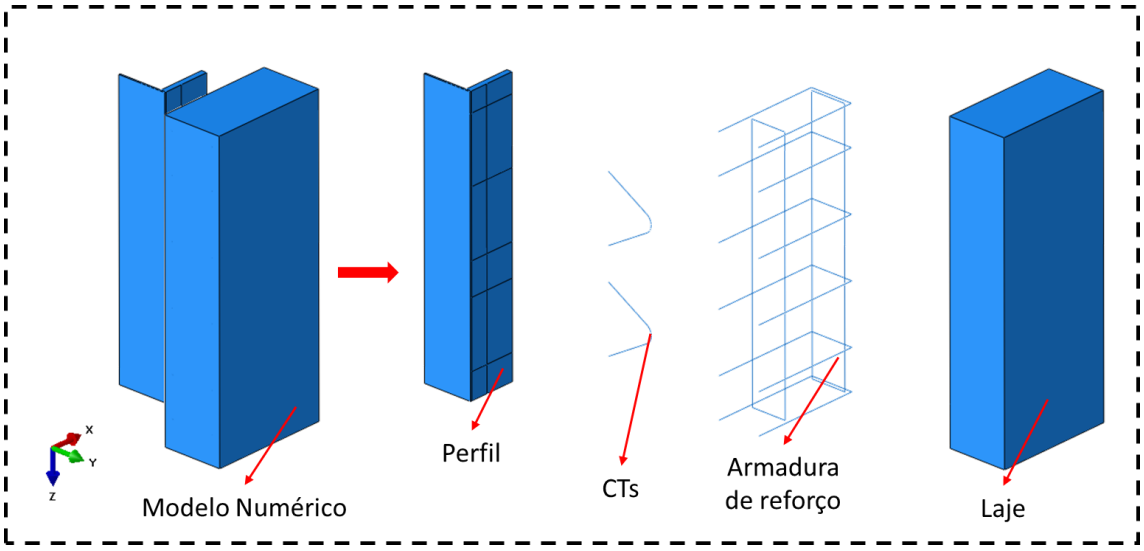


Figura 36: Modelo Numérico

3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO, INTERAÇÕES E CARREGAMENTO

No modelo numérico desenvolvido nesse estudo, foram inseridos dois *reference points*: um no centroide da seção transversal do perfil (RP-2) e outro no centroide da seção transversal da laje (RP-1). Eles foram usados para aplicação da carga e condição de contorno específica do experimento. Através do comando *coupling* (Figura 37) as seções transversais correspondentes foram acopladas à esses pontos de referência.

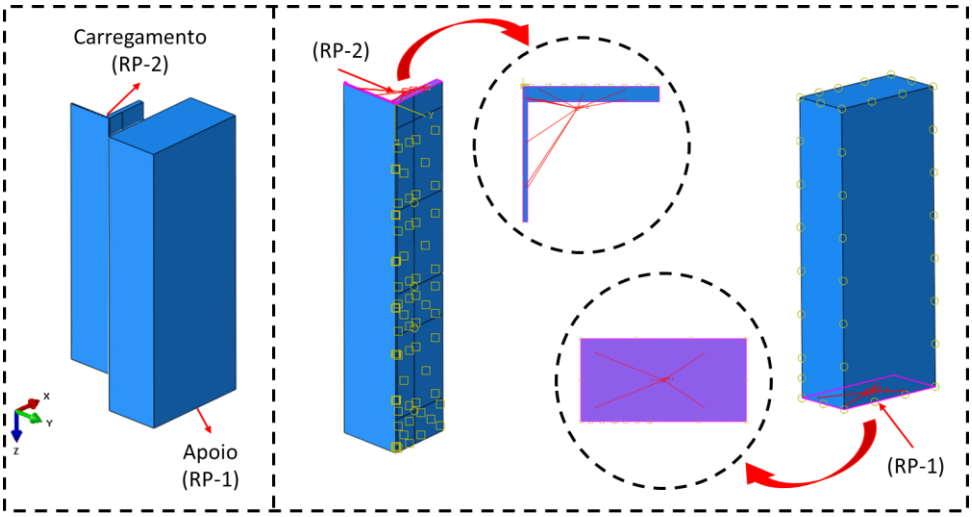
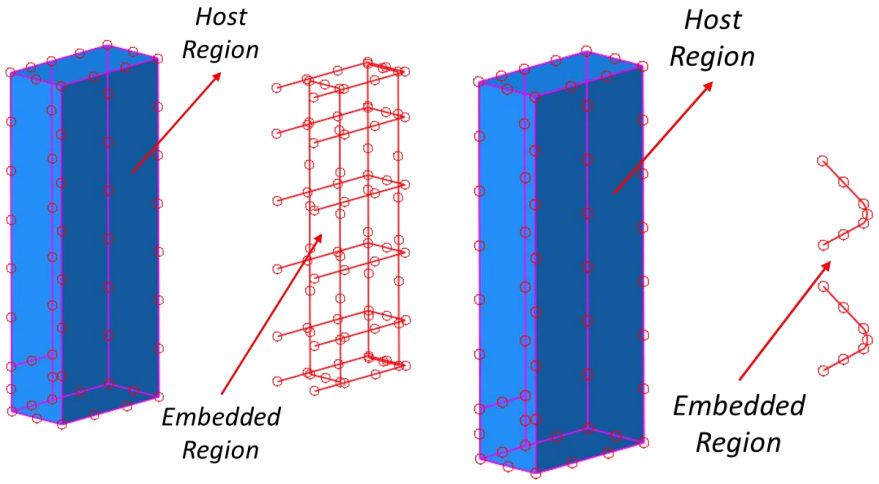
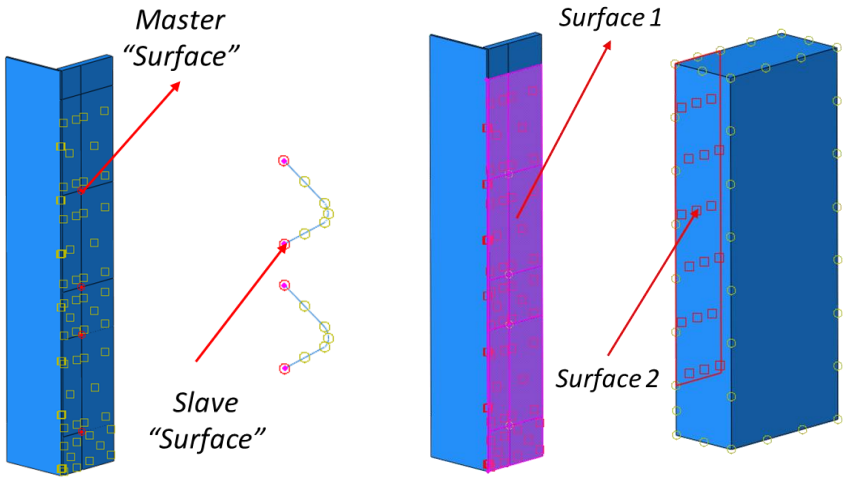


Figura 37: *Coupling* e Pontos de Referência



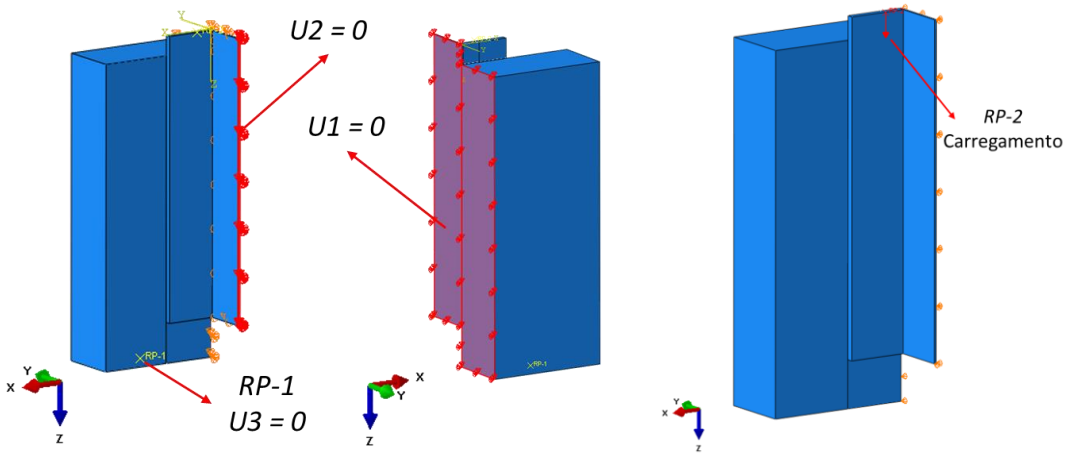
(a) Laje – Armadura (b) Laje – Conector



(c) Perfil – Conector (d) Perfil – Laje

Figura 38: Interações entre as partes

Por meio do comando *Embedded Region*, as armaduras de reforço (Figura 38a) e os conectores de cisalhamento (Figura 38b) foram embutidos na laje. Para simular a solda, por meio da interação *tie*, os CTs foram unidos ao perfil metálico (Figura 38c). Além disso, foi retirado o atrito pela propriedade Frictionless, no sentido tangencial, como também foi impedida a penetração entre as partes pela propriedade "*Hard" Contact*, no sentido normal às superfícies (Figura 38d).



(a) Condições de Contorno (b) Aplicação de Carga

Figura 39: Condição de Contorno e Carregamento

Ao modelo numérico foram impostas três condições de contorno (Figura 39a): duas relativas aos eixos de simetria ($U1 = 0$ e $U2 = 0$) e definida com base no ensaio experimental ($U3 = 0$). A condição $U3 = 0$ foi aplicada no ponto de referência RP-1 que controla toda a face -z da laje, simulando a forma como o espécime experimental está apoiado durante o ensaio. O carregamento foi aplicado no RP-2, que controla a face +z do perfil (Figura 39b).

O carregamento foi aplicado por meio de controle de velocidade para o modelo numérico do ensaio *push-out* com o CT de 12,5 mm. Nos modelos com CTs de 8,0 e 10 mm, o carregamento foi aplicado com controle de deslocamento. Todos foram aplicados da mesma forma e no mesmo ponto RP-2.

3.4. MATERIAIS

A seguir são apresentados os modelos constitutivos dos materiais que constituem o modelo numérico: aço MR250, aço CA50 e concreto.

3.4.1. Aço MR250

O perfil metálico é formado de aço MR250. De acordo com Barbosa (2016), no perfil metálico são desenvolvidos um baixo nível de tensões, mantendo-o no regime elástico durante o ensaio. Portanto, adotou-se um modelo constitutivo elástico linear para discretizar o aço MR250. Esse modelo é definido pelo módulo de Elasticidade e coeficiente de *Poisson*, ambos retirados dos resultados experimentais de Cavalcante (2010).

Como o processamento será realizado pelo método *Dynamic, Explicit,* ele requer informações de densidade do material. Na Tabela 2 são apresentados os valores adotados no modelo constitutivo.

Tabela 2: Modelo Constitutivo para o Aço MR250

Módulo de Elasticidade (MPa)	**Coeficiente de Poisson**	**Densidade (kg/mm³)**
210000	0.3	7,85E-06

3.4.2. Aço CA50

O conector de cisalhamento é fabricado a partir do aço CA50. Ele é o elemento objeto de estudo desse trabalho, por essa razão adotou-se um modelo constitutivo elasto-plástico, ou seja, que define uma região elástica e outra plástica, com endurecimento linear. Barbosa (2016) ensaiou a tração simples o aço CA50 e obteve os dados necessários para a caracterização desse modelo.

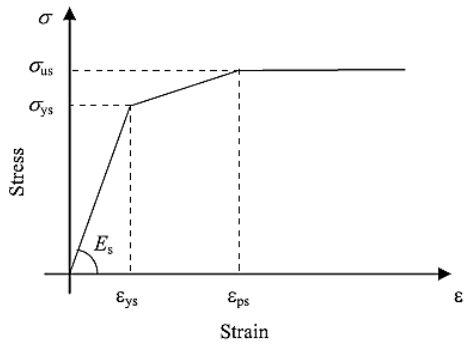


Figura 40: Modelo elasto-plástico tri-linear para o aço CA50 (NGUYEN; KIM, 2009)

Barbosa (2016) ensaiou corpos de prova para cada diâmetro de CT estudado. Sendo assim" para melhorar a fluência: "Sendo assim, foram desenvolvidos três modelos numéricos, um para cada diâmetro: 8,0, 10 e 12,5 mm. Nas Tabelas 3 a 5, são apresentados os valores de módulo de elasticidade, tensão de escoamento e ruptura, deformações e densidades que caracterizam o material para os diâmetros de 8,0, 10 e 12,5 mm.

Tabela 3: Modelo Constitutivo para o Aço CA50 de 8,0 mm (BARBOSA, 2016)

Módulo de Elasticidade (MPa)	**Coeficiente de Poisson**	**Densidade (kg/mm³)**
198400	0.3	7,85E-06
Plasticidade		
Tensão de Escoamento (MPa)	**Deformação Plástica**	
561,2	0	
Tensão de Ruptura MPa)	**Deformação Plástica**	
663,2	0,06	

Tabela 4: Modelo Constitutivo para o Aço CA50 de 10,0 mm (BARBOSA, 2016)

Módulo de Elasticidade (MPa)	**Coeficiente de Poisson**	**Densidade (kg/mm³)**
194500	0.3	7,85E-06
Plasticidade		
Tensão de Escoamento (MPa)	**Deformação Plástica**	
591,6	0	
Tensão de Ruptura MPa)	**Deformação Plástica**	
722,4	0,06	

Tabela 5: Modelo Constitutivo para o Aço CA50 de 12,5 mm (BARBOSA, 2016)

Módulo de Elasticidade (MPa)	**Coeficiente de Poisson**	**Densidade (kg/mm³)**
195300	0.3	7,85E-06
Plasticidade		
Tensão de Escoamento (MPa)	**Deformação Plástica**	
595,3	0	
Tensão de Ruptura MPa)	**Deformação Plástica**	
716,6	0,06	

3.4.3. Concreto

O concreto é um material que apresenta resistência distinta quando submetido à compressão e à tração. Além disso, o mecanismo de falha também é distinto. Na compressão o concreto falha por esmagamento e na tração por fissuração. Esse comportamento exige um modelo constitutivo complexo que seja capaz de simular esses fenômenos. Por exemplo, o Modelo do Dano-Plástico (*Concrete Plastic Damage Model*) (ABU AL-RUB; KIM, 2010).

Nguyen e Kim (2009) adotaram um modelo constitutivo para o concreto baseado nas equações prescritas pelo EN 1992-1-1:1992. Inserindo as informações através do modelo *Concrete Damaged Plasticity* disponível no ABAQUS 2021. Os parâmetros plásticos constitutivos adotados nesse estudo foram os mesmo de Nguyen e Kim (2009) e estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros Plásticos para o CPDM

Dilation Angle	***Eccentricity***	f_{bo}/f_{co}	K_C	***Viscosity Parameter***
20	0.1	1.16	0	0

O parâmetro K_C é definido como a razão entre a tensão desviadora na tração e na compressão uniaxial (tensões sobre o meridiano de tração – MT e meridiano de compressão – MC). O ângulo de dilatância quantifica a razão entre o incremento de volume plástico e a distorção plástica. Razão entre a tensão de início de não linearidade

na compressão biaxial e axial, f_{b0}/f_{c0} e Excentricidade da superfície de potencial plástico, ϵ (OLLER, 1988).

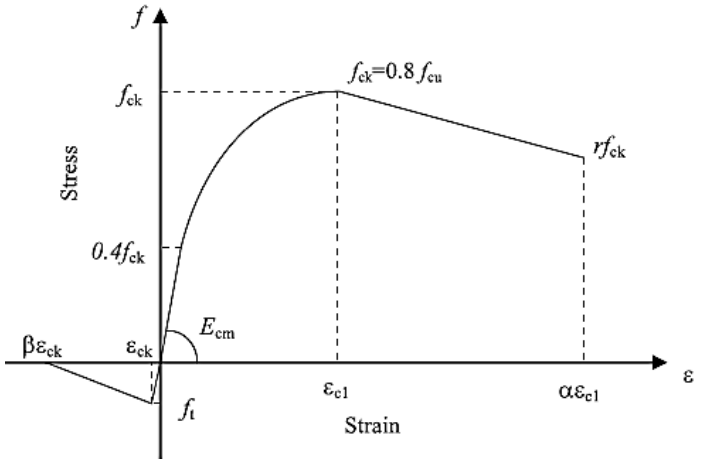


Figura 41: Relação tensão-deformação para o concreto

A Figura 41 apresenta esquematicamente a relação entre tensão e deformação adotada por Nguyen e Kim (2009). O módulo de Elasticidade, E_{cm}, é dado pela equação empírica Eq. 7 (EN 1992-1-1:1992). Esse módulo controla a primeira região, linear elástica, do caminho de equilíbrio do concreto. Essa região é delimitada por $0{,}4f_{ck}$.

$$E_{cm} = 9{,}5\sqrt[3]{(f_{ck} + 8)} \tag{7}$$

Onde:

E_{cm} é o Módulo de Elasticidade médio, em GPa;

f_{ck} é a resistência à compressão cilíndrica do concreto, em MPa.

A segunda região, $0{,}4f_{ck}$ a f_{ck}, é descrita por uma parábola não linear calculada pela Eq. 8 do EN 1992-1-1:1992. E a terceira região é linear decrescente com tensão igual a rf_{ck} e deformação $\alpha\varepsilon_{c1}$.

$$\sigma_c = \left(\frac{kn - n^2}{1 + (k-2)n}\right) f_{ck} \tag{8}$$

Onde:

$n = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$; $\varepsilon_{c1} = 0{,}0022$ é a deformação do concreto quando atinge f_{ck};

$k = 1{,}1E_{cm}\frac{\varepsilon_{c1}}{f_{ck}}$ é o Módulo de Elasticidade médio, em GPa.

Para o comportamento sob tração, a primeira região é linear elástica crescente e governada pela resistência à tração, f_t, e o módulo de elasticidade média, E_{cm}. E a segunda região linear decrescente, de f_t a 0, com deformação igual a $\beta\varepsilon_{ck}$. Os parâmetros r, α e β estão associados ao estudo de Ellobody *et al*., (2006-b).

Na Tabela 7, estão apresentados os valores de E_{cm}, calculado pelo $f_{ck} = 34MPa$ retirado de Barbosa (2016), do coeficiente de *Poisson*, da densidade de concreto armado e dos parâmetros r, α e β. Os primeiros são únicos para os modelos de 8,0, 10 e 12,5 mm. Os parâmetros variam para cada modelo.

Tabela 7: Propriedades do Concreto e Parâmetros do Modelo Constitutivo

Propriedades do Concreto			
E_{cm} (MPa)	**Poisson**		**Densidade (kg/mm³)**
33022,25	0,2		2,5E-06
Parâmetros da Curva			
Diâmetro	r	α	β
8,0 mm	0,65	11	50
10 mm	0,54	5	30
12,5 mm	0,54	2	60

3.5. ELEMENTOS FINITOS

A laje de concreto e o perfil metálico foram discretizados com C3D8R, um elemento finito cúbico tridimensional de oito nós com integração reduzida. Esse elemento utiliza menos pontos de integração, gerando menor custo computacional. Foram comparados os elementos finitos C3D8 (com integração completa) e C3D8R, e não foram observadas diferenças significativas que justificassem o uso do primeiro.

Já o conector e a armadura de reforço foram discretizados com elementos finitos de barra 3D. O conector foi modelado com o elemento B31, um elemento de viga que possui três graus de liberdade, enquanto a armadura de reforço foi modelada com o elemento T3D2, um elemento de treliça que possui um grau de liberdade (deslocamento). A densidade de malha do perfil, do conector e da armadura de reforço é constante em todos os modelos. Contudo, a densidade de malha da laje de concreto varia entre os

modelos de 8,0 mm (15 mm), 10 mm (25 mm) e 12,5 mm (35mm). Na Figura 42 está representada a malha que discretiza o modelo numérico de 12,5 mm.

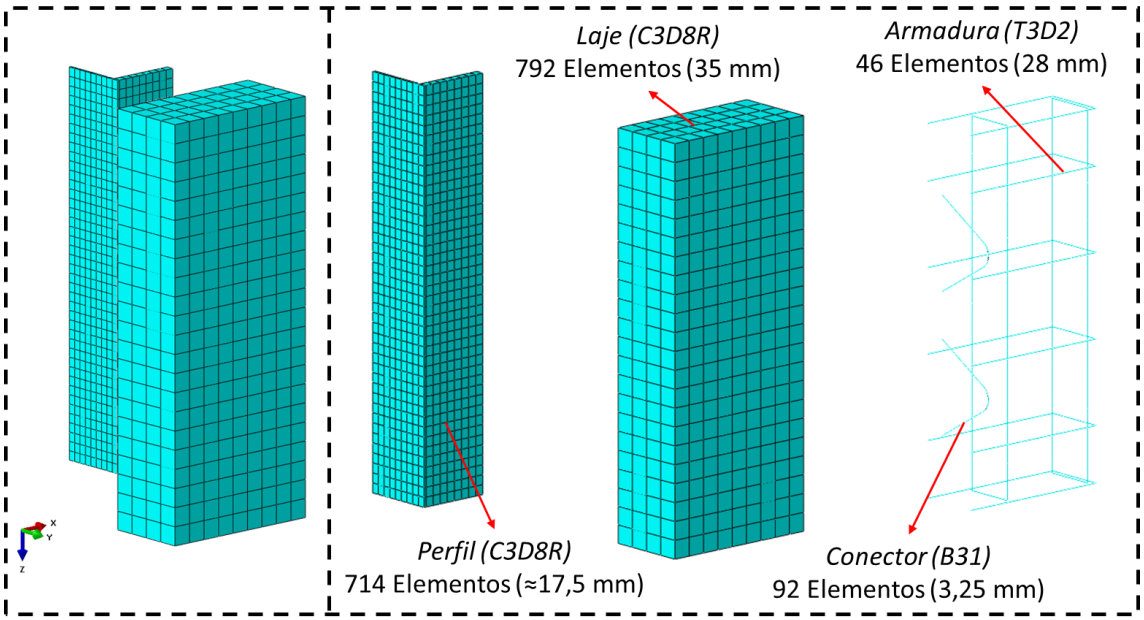


Figura 42: Malha de Elementos Finitos para o modelo numérico de 12,5 mm

3.6. MÉTODO DE ANÁLISE

No primeiro momento da pesquisa, tentou-se solucionar o modelo com métodos estáticos; contudo, não se obteve convergência. Mesmo variando a densidade de malha, a carga aplicada e o método de análise (ora General e *Riks*, ora apenas *Riks*), o modelo não conseguia convergir.

sso é explicado pelo fato de o modelo considerar as não-linearidades dos materiais (aço e concreto), assim como os contatos entre as partes do modelo. Essas considerações impõem alta complexidade ao modelo, justificando a ineficiência dos métodos estáticos na solução. Logo, no segundo momento, buscou-se solucionar o modelo com um método dinâmico em uma análise quase-estática.

3.6.1. Dynamic, Explicit

O método dinâmico explícito com passo de tempo pode ser aplicado em análises quase-estáticas, desde que os efeitos da inércia sejam controlados pela lenta aplicação da

carga. Para que a análise seja considerada quase-estática, o manual do ABAQUS 2021 estabelece que a energia cinética não deve superar 10% da energia interna.

Este método resolve a equação de equilíbrio dinâmico por meio da regra de integração da diferença central. Desse modo, os deslocamentos e as velocidades são determinados a partir de parâmetros conhecidos, sem a necessidade de montagem e inversão das matrizes de massa e rigidez a cada incremento. Isso é feito em cada passo de carga no método de *Riks*, exigindo maior esforço computacional.

$$(\boldsymbol{M}^{NJ})\ddot{u}^{N}_{(i)} + I^{J}_{(i)} = P^{J}_{(i)} \tag{9}$$

A Eq. 9 apresenta a formulação do método de análise dinâmico explícito implementado no ABAQUS 2021. Onde $\boldsymbol{M}^{NJ}$ é a matriz diagonal de massa, I^{j} é o vetor de forças internas, P^{j} é o vetor de forças externas e $\ddot{u}^{N}_{(i)}$ é a segunda derivada do vetor de deslocamentos (aceleração). O índice N representa a componente do grau de liberdade, deslocamento ou rotação, o índice *i* é o número do incremento do método e o índice *J* o elemento finito.

Pela formulação dos elementos finitos, a equação do movimento para análise não-linear pode ser escrita de acordo com (WANG *et al*., 2004), como na Eq. 10. Nela, $\boldsymbol{C}$ é a matriz de amortecimento e $\dot{u}$ é a primeira derivada do vetor de deslocamento (velocidade). Percebe-se que, na formulação do método no ABAQUS, o termo de amortecimento não é considerado. Ele é considerado no limite de estabilidade, que mantém a estabilização entre as forças internas e externas.

$$\boldsymbol{M}\ddot{u} + \boldsymbol{C}\dot{u} + f_{int} = f_{ext} \tag{10}$$

O método dinâmico ainda apresenta outra vantagem em relação ao método de *Riks*, pois é indicado para problemas que envolvem dano, contato e grandes deformações (ABAQUS 2021). E, segundo JUNG (1998), NGUYEN e KIM (2009), o método de *Riks* costuma apresentar problemas de convergência para esses casos. No modelo desenvolvido, há a presença de grandes deformações quando o aço do conector atinge o escoamento, assim como a fissuração do concreto próxima à base dos conectores, justificando a adoção desse método de análise.

4. VALIDAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se, o processo de validação dos modelos numéricos desenvolvidos nesta pesquisa. A validação foi realizada com os dados experimentais de Barbosa (2016) e com os resultados numéricos de Lima (2018). Foram utilizadas as curvas Deslizamento × Carga, a configuração deformada dos conectores, a distribuição de tensões de *von Mises* nos conectores e na laje de concreto, e a capacidade resistente. Por fim, comparou-se o tempo de processamento do modelo numérico desenvolvido neste trabalho com o modelo desenvolvido por Lima (2018).

4.1. CURVAS CARGA X DESLIZAMENTO

A Figura 43 apresenta as curvas experimentais de Barbosa (2016) e a curva numérica, para o modelo de 8,0 mm, desenvolvida neste trabalho. Percebe-se que há uma boa concordância entre as curvas. Na fase inicial, elástica (0 a 1 mm, aproximadamente), o modelo numérico apresenta uma rigidez maior; contudo, alcança um pico de carga bastante próximo ao dos experimentais (um erro máximo de 3,88% na carga máxima).

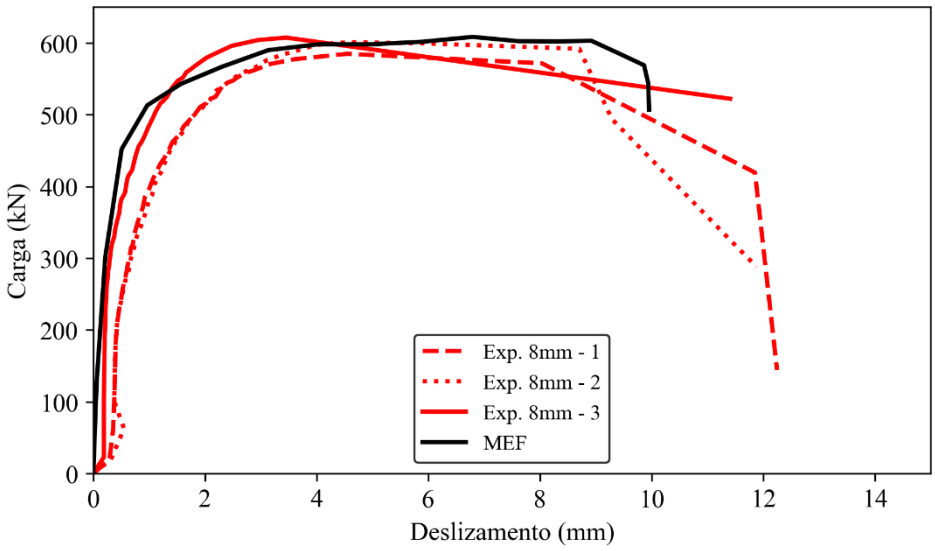


Figura 43: Curva MEF-EXP Carga x Deslizamento modelo de 8,0 mm

A Figura 44 apresenta as curvas experimentais de Barbosa (2016) e a curva numérica para o modelo de 10,0 mm, desenvolvida neste estudo. Nota-se uma boa concordância entre as curvas experimentais e numéricas. Entretanto, observa-se uma

grande divergência nos valores das curvas experimentais, embora o comportamento geral seja semelhante. Esse fato faz com que a curva numérica não se ajuste tão bem às curvas experimentais como no modelo de 8,0 mm (erro de máximo de 6,56%).

No entanto, na fase elástica (até 2,0 mm), as curvas convergem bem. Na fase plástica, há um pequeno ganho de capacidade resistente, levando à perda de resistência na região entre 15 e 17,5 mm. De modo geral, a curva numérica apresentou boa convergência e aproximou-se satisfatoriamente das curvas experimentais.

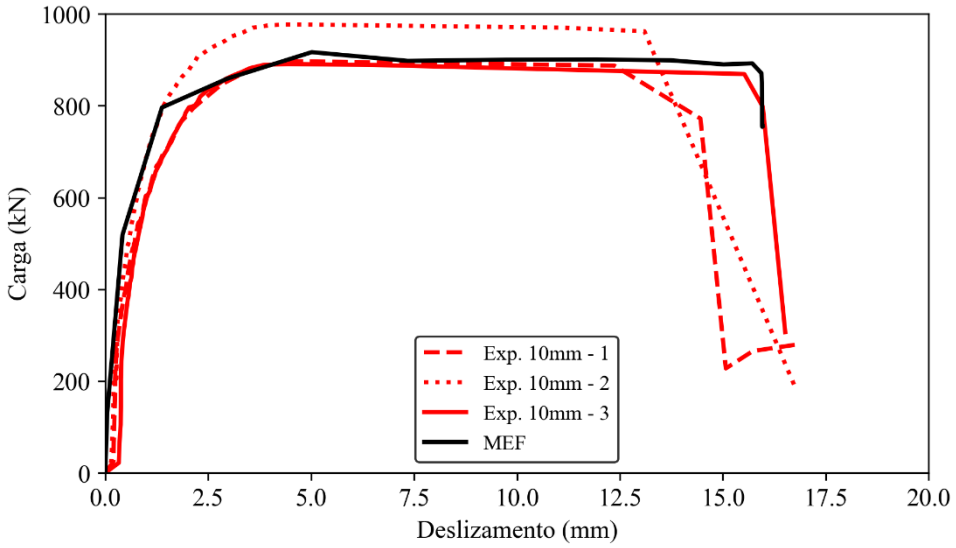


Figura 44: Curva MEF-EXP Carga x Deslizamento modelo de 10,0 mm

Na Figura 45, são mostradas as curvas experimentais e numéricas para o modelo de 12,5 mm. É evidente a ótima concordância (um erro máximo de 1,12%) entre as curvas. Trata-se, inclusive, da melhor concordância entre todos os modelos, incluindo os de 8,0 mm (Figura 43) e 10,0 mm (Figura 44). Nas curvas experimentais, nota-se a fase de acomodação do material na região entre 0 e 200 kN. Além disso, observa-se um comportamento anômalo próximo aos 600 kN, provavelmente oriundo dos equipamentos experimentais.

Apesar disso, as fases elástica e plástica da curva numérica convergem bem com as três experimentais. Além disso, a região de perda de resistência, próxima a 15 mm, também converge entre as curvas experimentais e a numérica.

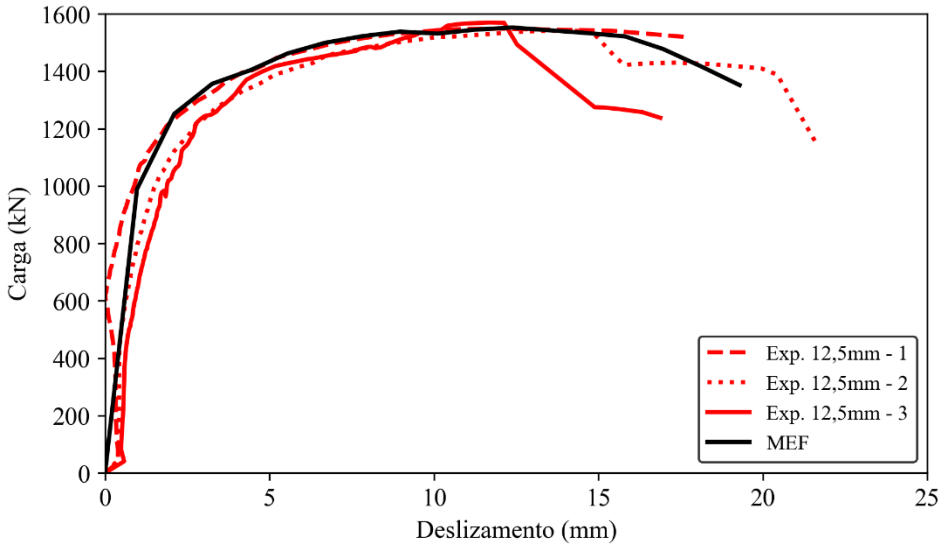


Figura 45: Curva MEF-EXP Carga x Deslizamento modelo de 12,5 mm

Na Figura 46, são apresentadas as curvas Carga x Deslizamento obtidas numericamente por Lima (2018) e neste estudo. Observa-se uma boa concordância entre todas as curvas. No entanto, as curvas do presente estudo apresentam rigidez ligeiramente superior às de Lima (2018). Na região de perda de rigidez, as curvas dos conectores de 8,0 mm e 10,0 mm exibem uma "queda" repentina, semelhante ao comportamento experimental. Em contraste, as curvas de Lima (2018) mostram uma transição mais suave. Para a curva do conector de 12,5 mm, o comportamento é mais próximo entre os dois estudos, embora a curva deste trabalho apresente uma queda mais acentuada.

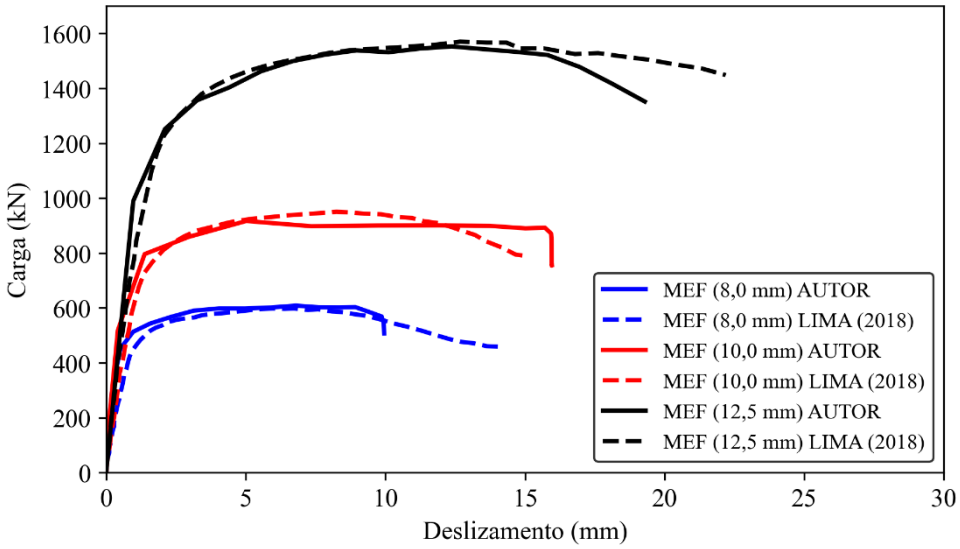
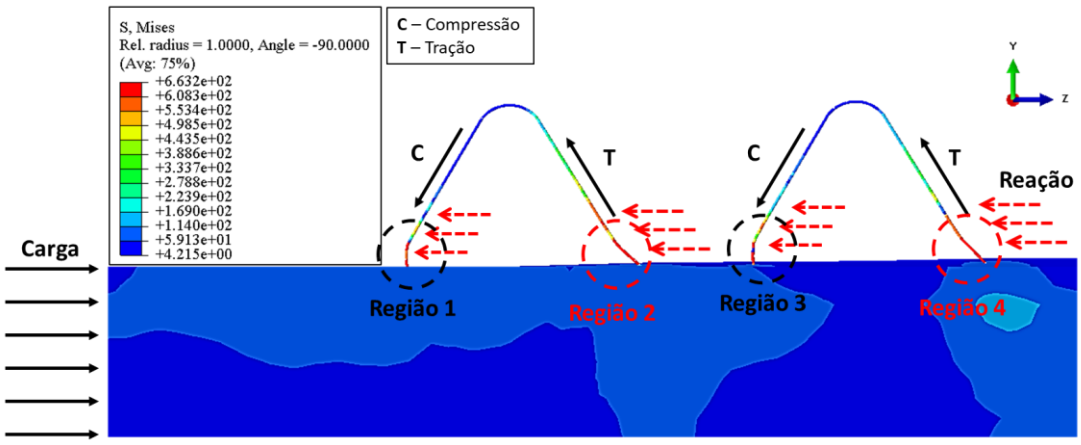


Figura 46: Curva MEF (Autor) – MEF (LIMA, 2018) Carga x Deslizamento

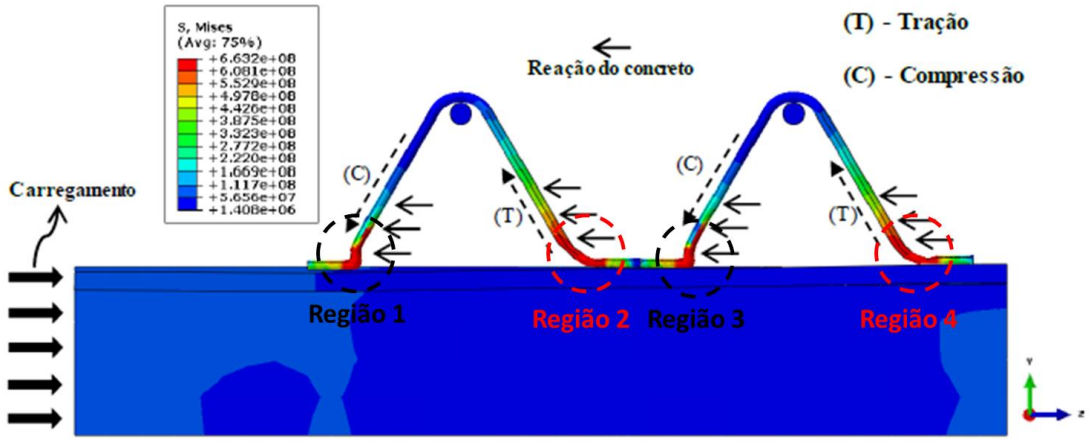
4.2. DEFORMADAS DOS CONECTORES

Na Figura 47, são apresentadas as configurações deformadas dos conectores de 8,0 mm: deste estudo (Figura 47a), de Lima (2018) (Figura 47b) e de Barbosa (2016) (Figura 47c). Em todas as configurações, observa-se que as hastes estão submetidas a esforços distintos, com uma tracionada e a outra comprimida. Além disso, identifica-se uma curvatura na base dos conectores, identificadas nas figuras como regiões, resultante desses esforços.

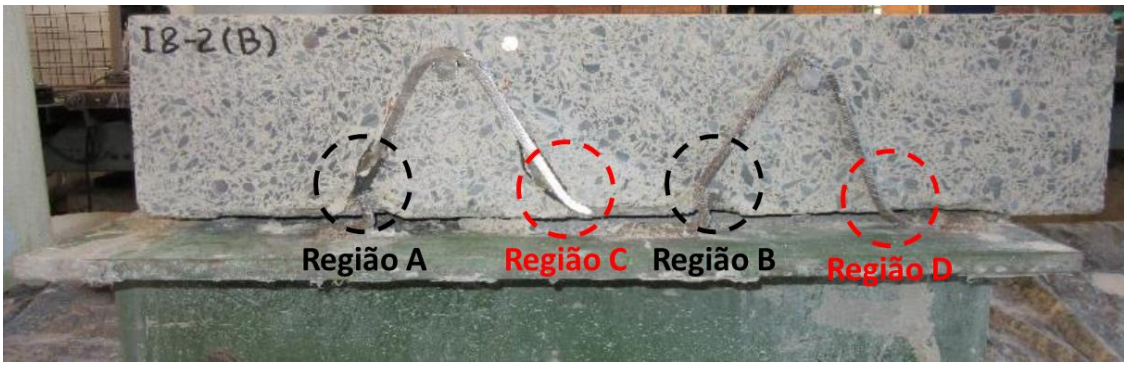
Há uma boa concordância entre as Regiões 1 e 3 do modelo deste estudo com as Regiões 1 e 3 do modelo de Lima (2018), bem como com as Regiões A e C do espécime experimental de Barbosa (2016). O mesmo padrão é observado nas Regiões 2 e 4 do modelo do autor com as Regiões 2 e 4 do modelo de Lima (2018), bem como com as Regiões B e D do espécime experimental de Barbosa (2016).



(a) Autor (2025)



(b) Adaptado de Lima (2018)

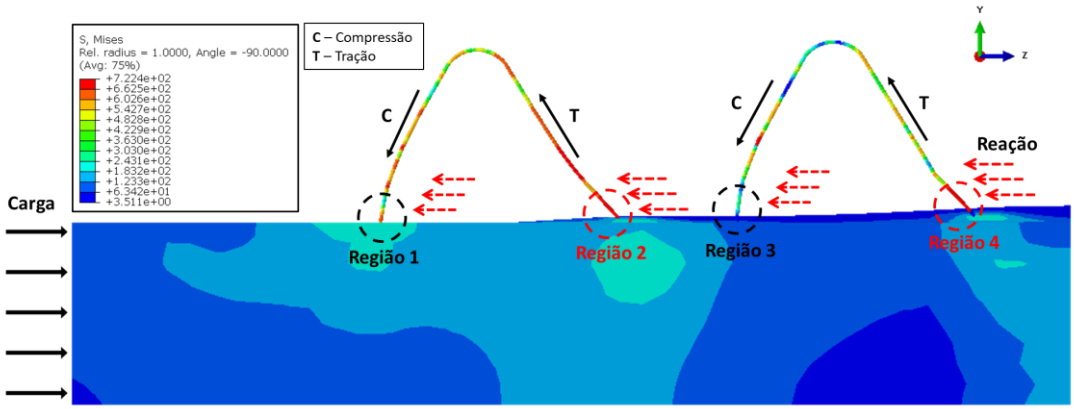


(c) Adaptado de Barbosa (2016)

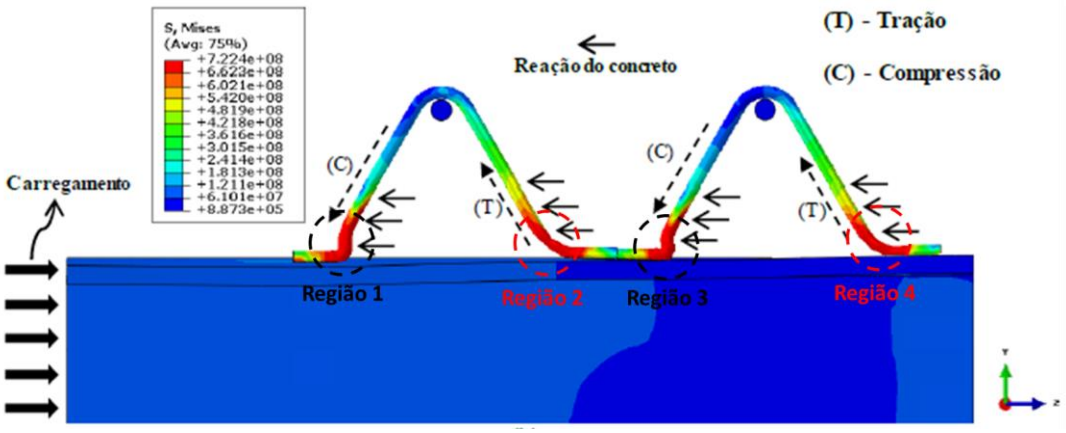
Figura 47: Deformada dos conectores de 8,0 mm

Na Figura 48, são apresentadas as configurações deformadas dos conectores de 10,0 mm: deste estudo (Figura 48a), de Lima (2018) (Figura 48b) e de Barbosa (2016) (Figura 48c). As tensões desenvolvidas seguem o padrão observado nos conectores de 8,0 mm, com uma haste tracionada e outra comprimida. No entanto, para os conectores de 10,0 mm, a curvatura na base é menos pronunciada em comparação aos de 8,0 mm.

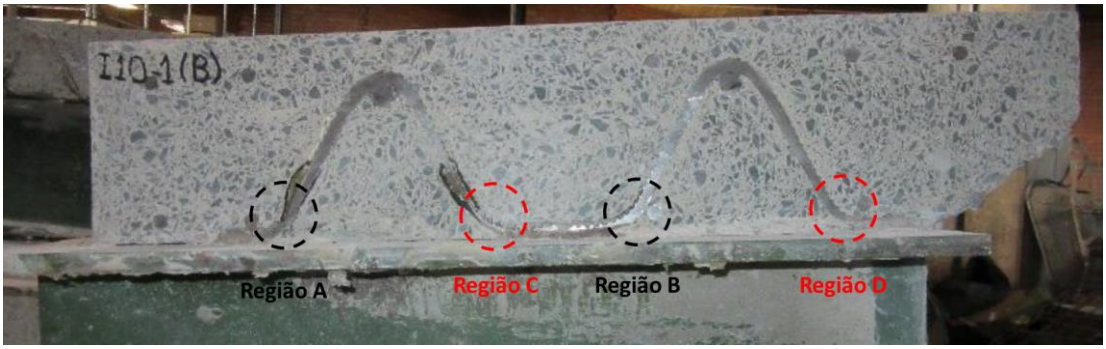
Essa observação está em concordância com o modelo numérico de Lima (2018) e o experimental de Barbosa (2016), nos quais os conectores também apresentam uma curvatura menos acentuada. Ainda assim, é possível correlacionar as configurações deformadas das Regiões 1 e 3 deste estudo com as Regiões 1 e 3 de Lima (2018) e as Regiões A e C de Barbosa (2016). O mesmo se aplica às Regiões 2 e 4 deste trabalho, que correspondem às Regiões 2 e 4 de Lima (2018) e às Regiões B e D de Barbosa (2016).



(a) Autor (2025)



(b) Adaptado de Lima (2018)



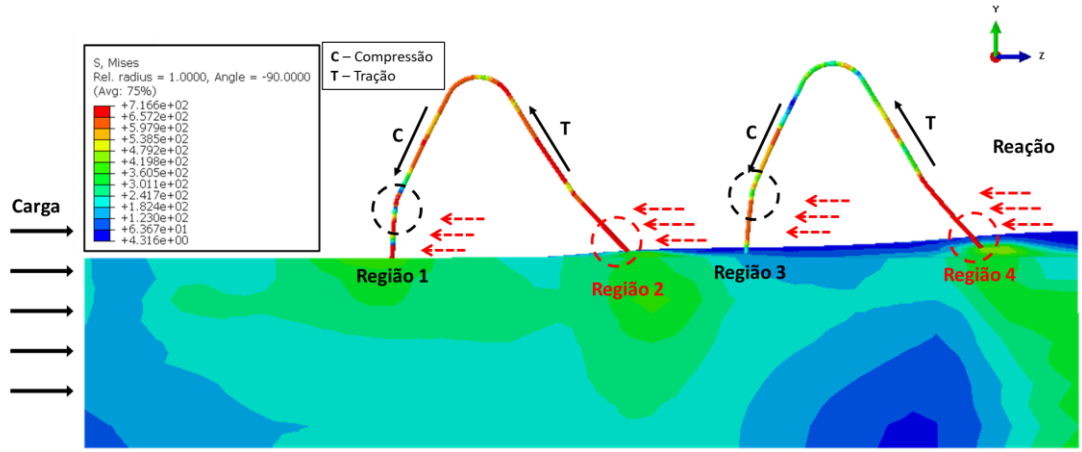
(c) Adaptado de Barbosa (2016)

Figura 48: Deformada dos conectores de 10,0 mm

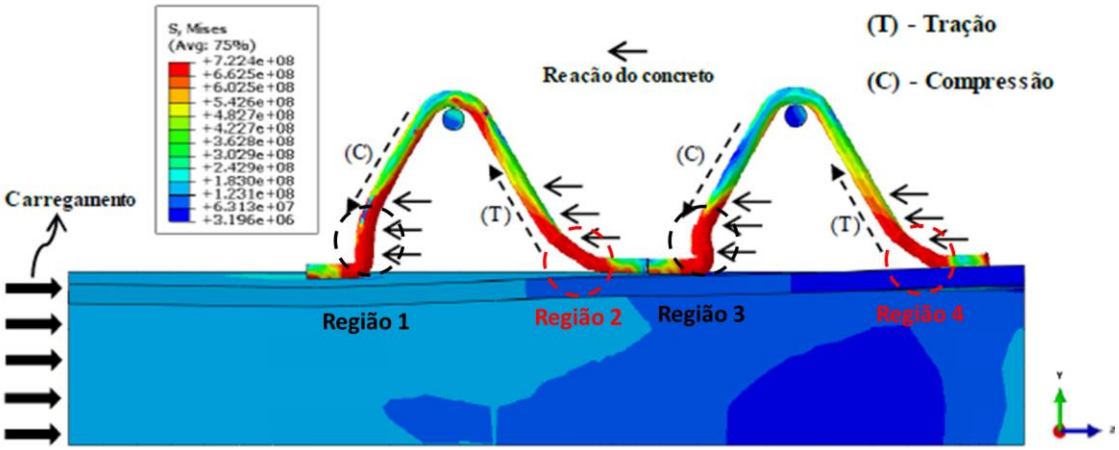
Na Figura 49, são apresentadas as configurações deformadas dos conectores de 12,5 mm: deste estudo (Figura 49a), de Lima (2018) (Figura 49b) e de Barbosa (2016) (Figura 49c). Nesses modelos, observa-se uma deformação mais pronunciada na haste comprimida, tanto nos modelos numéricos quanto nos espécimes experimentais. Há uma alta concordância entre as configurações deformadas do modelo deste estudo, o modelo numérico de Lima (2018) e o experimental de Barbosa (2016).

Nas regiões destacadas, percebe-se uma boa aproximação entre o modelo deste estudo e os modelos usados para calibração. As Regiões 1 e 3 deste trabalho apresentam alta precisão em relação às Regiões 1 e 3 de Lima (2018) e às Regiões A e C de Barbosa (2016). Da mesma forma, as Regiões 2 e 4 deste estudo correspondem às Regiões 2 e 4 de Lima (2018) e às Regiões B e D de Barbosa (2016).

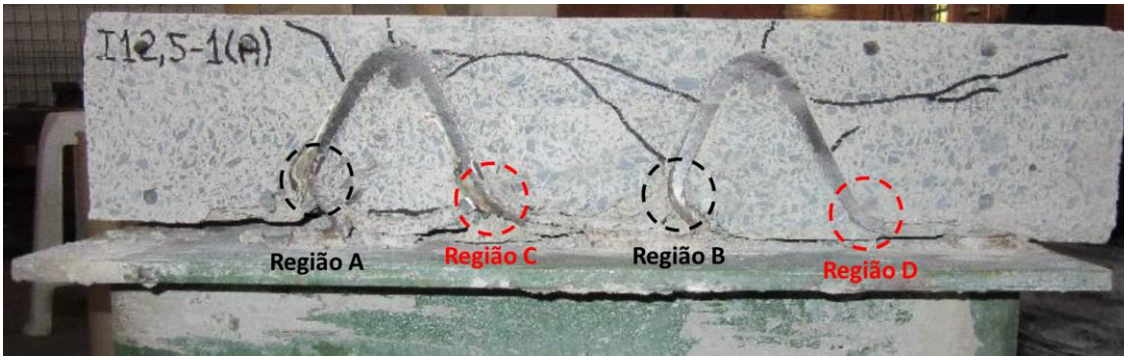
Entretanto, com a discretização do conector usando elementos de barra (B31), o modelo não captura a estricção da haste tracionada (haste à direita), para todos os diâmetros, como em Lima (2018). Contudo, o fenômeno pode ser inferido pelo nível de tensão na região, que é similar ao de Lima (2018).



(a) Autor (2025)



(b) Adaptado de Lima (2018)



(c) Adaptado de Barbosa (2016)

Figura 49: Deformada dos conectores de 12,5 mm

4.3. TENSÕES DE *VON MISSES*

Nesse item, a análise das tensões de *von Misses* será realizada separadamente para os conectores e para a laje de concreto armado.

4.3.1. Nos CTs

Para essa análise, a escala foi ajustada para que a tensão máxima corresponda à tensão de escoamento, permitindo destacar as regiões onde o aço CA50 atinge esse limite. Os valores considerados foram: 561,2 MPa para o conector de 8,0 mm, 591,6 MPa para o de 10,0 mm e 595,3 MPa para o de 12,5 mm.

Na Figura 50, são apresentadas as tensões de *von Misses* nos conectores, evidenciando uma distribuição semelhante entre os conectores de diferentes diâmetros. Observa-se que as maiores tensões, superiores à tensão de escoamento, concentram-se predominantemente na base dos conectores. Além disso, os pontos de tensão máxima indicam valores superiores à tensão de ruptura, sugerindo que a falha do conector ocorre nessa região.

Esse comportamento está em concordância com os dados experimentais de Barbosa (2016), que também indicam a ruptura do conector na base. Ao comparar com o modelo de Lima (2018), verifica-se que, nas Regiões 2 e 4 das Figuras 47b, 48b e 49b, ocorre o fenômeno de estricção, indicando tensões superiores às de escoamento, o que corrobora com as observações do presente estudo.

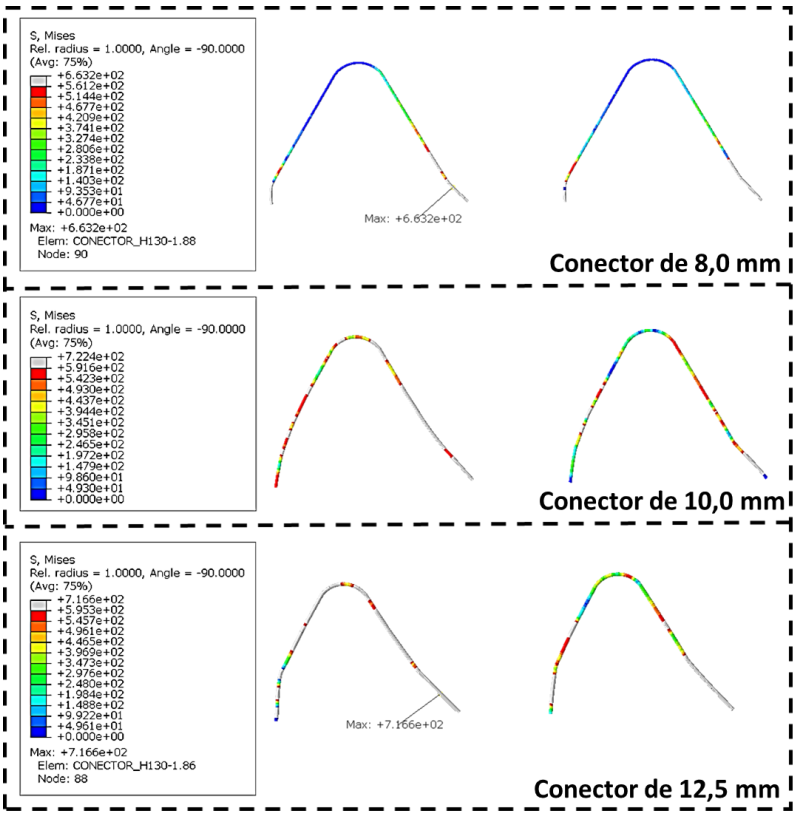


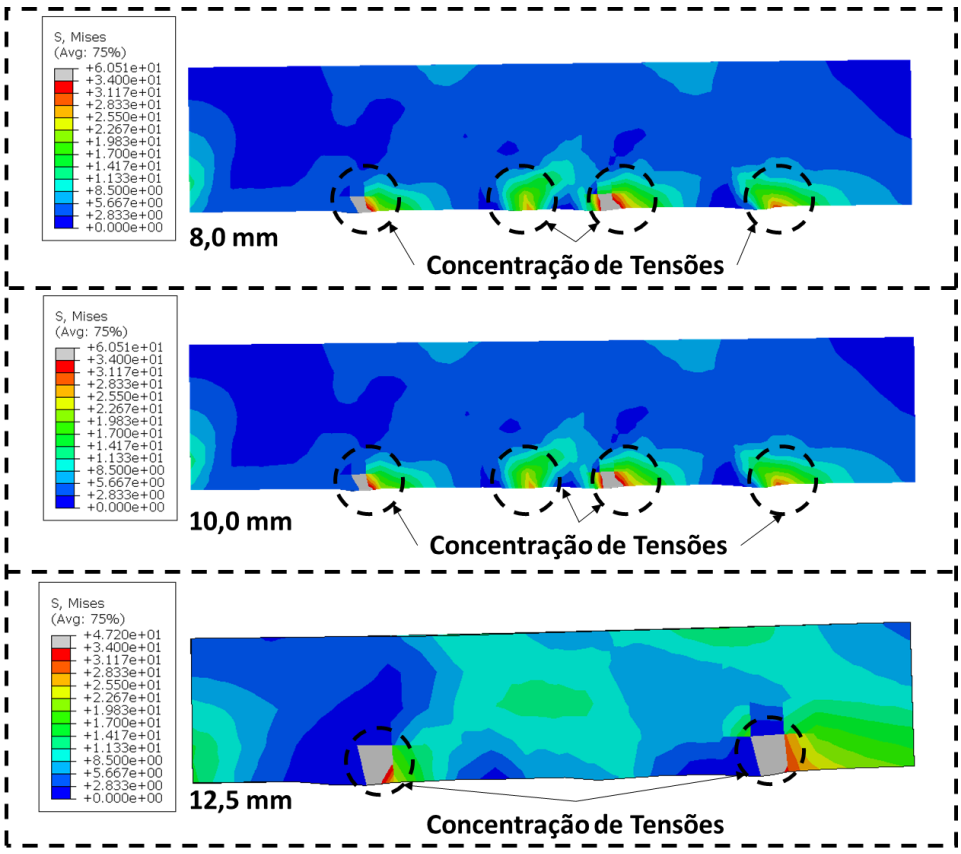
Figura 50: Tensões de *von Misses* nos Conectores

4.3.2. Na laje de concreto

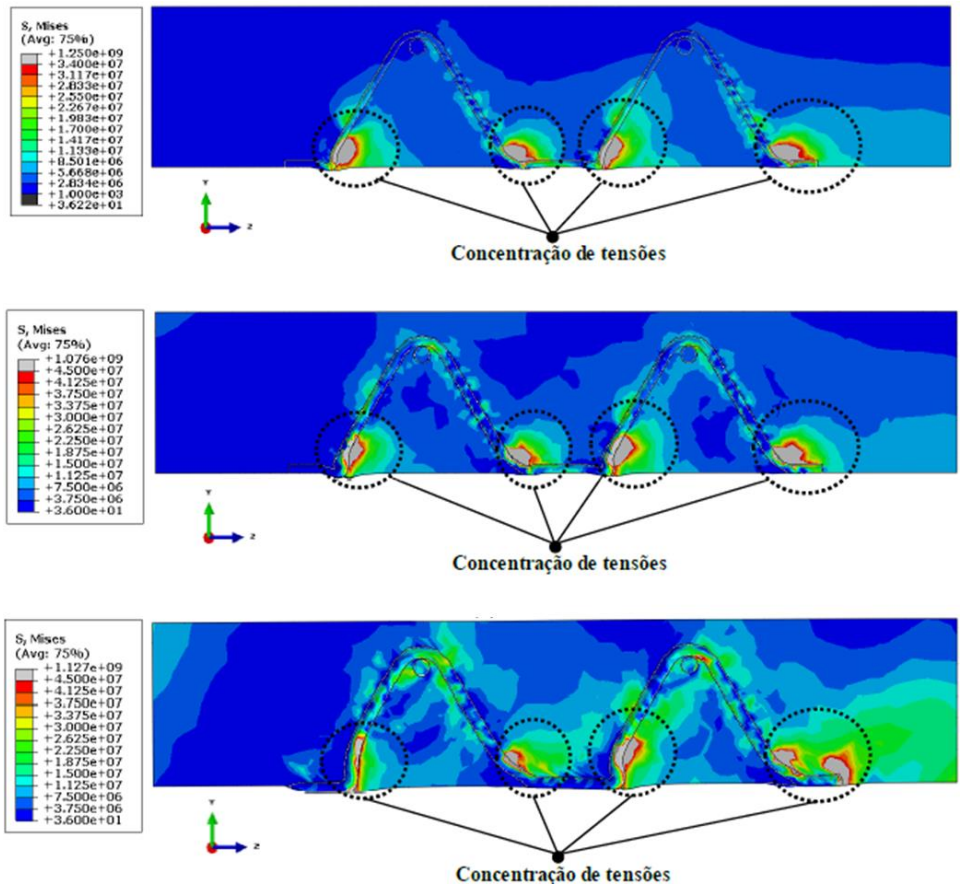
Na Figura 51, são apresentadas as distribuições de tensão no concreto para este estudo (Figura 51a) e para Lima (2018) (Figura 51b). Observa-se uma boa coerência entre os resultados, com concentração de tensões na região próxima à base das hastes dos conectores em ambos os modelos.

Além disso, verifica-se que essas tensões ultrapassam a resistência à compressão do concreto (34 MPa), indicando o esmagamento do material nessas regiões. Esse comportamento corrobora o observado nas Figuras 47c, 48c e 49c (item 4.2), retiradas de Barbosa (2016), onde é perceptível o esmagamento do concreto nas Regiões A a D.

O modelo com conector de 12,5 mm foi o que mais diferiu dos resultados da literatura. No entanto, ainda apresenta concentração de tensões nas mesmas regiões apontadas na literatura. Essa divergência provavelmente decorre da menor densidade da malha utilizada no modelo de 12,5 mm, cujo tamanho de elemento é de 35 mm, enquanto nos modelos de 8,0 mm e 10,0 mm os elementos possuem, respectivamente, 15 mm e 25 mm.



(a) Autor



(b) Lima (2018)

Figura 51: Tensões de *von Misses* no Concreto

4.4. CAPACIDADE RESISTENTE E CURVAS DE ENERGIA

Nas Tabelas 8, 9 e 10 são apresentados os resultados para os CTs de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm, respectivamente. Os resultados para o CT de 8,0 mm (Tabela 8) apresentaram erro inferior a 5%, tanto em relação ao modelo numérico de Lima (2018), com 2,02%, quanto à média dos resultados experimentais de Barbosa (2016), com 0,16%.

O maior erro para esse CT foi em relação ao ensaio EXP.8,0 mm – 1, atingindo 3,88%. Esse valor corresponde a aproximadamente o dobro do erro da média dos experimentais, que foi de 1,75%. Essa discrepância se deve à diferença entre o EXP.8,0 mm – 1 em relação aos outros ensaios experimentais, sendo de 2,70% para o EXP.8,0 mm – 2 e de 3,72% para o EXP.8,0 mm – 3.

Portanto, os resultados de capacidade resistente para o modelo com CT de 8,0 mm deste estudo estão muito próximos dos experimentais, indicando que a discretização do conector com elemento de barra (B31) não compromete a precisão dos resultados.

Tabela 8: Capacidade Resistente do CT de 8,0 mm

CAPACIDADE RESISTENTE POR CT DE 8,0 mm (kN)					
MODELO	**EXP.**	**LIMA (2018)**	**MEF**	**MEF/EXP**	**MEF/LIMA (2018)**
EXP. 8,0 mm – 1	73,10	74,51	76,05	**3,88%**	**2,02%**
EXP. 8,0 mm – 2	75,13			**1,22%**	
EXP. 8,0 mm – 3	75,93			**0,16%**	
Média	74,72			**1,75%**	

Na Tabela 9, é apresentada a capacidade resistente para o CT de 10,0 mm. O erro do modelo deste estudo em relação ao de Lima (2018) foi de 0,60%, demonstrando a eficácia do método. Em comparação com os resultados experimentais, o maior erro foi de 6,56%, observado no modelo EXP. 10,0 mm – 2, um valor significativo em relação aos demais.

Esse erro mais elevado pode ser explicado pela grande divergência entre os resultados experimentais. O valor do modelo EXP. 10,0 mm – 2 (122,10 kN) é 8,16% superior ao do EXP. 10,0 mm – 1 e 8,80% superior ao do EXP. 10,0 mm – 3. Dessa forma, o alto erro do modelo numérico em relação ao EXP. 10,0 mm – 2 deve ser analisado considerando essa variação.

Quando comparado à média dos resultados experimentais (115,27 kN), o erro foi de apenas 0,53%, indicando que o valor obtido numericamente nesta pesquisa apresenta uma excelente aproximação com a média dos resultados.

Tabela 9: Capacidade Resistente do CT de 10,0 mm

CAPACIDADE RESISTENTE POR CT DE 10,0 mm (kN)					
MODELO	**EXP.**	**LIMA (2018)**	**MEF**	**MEF/EXP**	**MEF/LIMA (2018)**
EXP. 10,0 mm – 1	112,13	115,27	114,58	**2,15%**	**0,60%**
EXP. 10,0 mm – 2	122,10			**6,56%**	
EXP. 10,0 mm – 3	111,35			**2,82%**	
Média	115,19			**0,53%**	

Na Tabela 10, é apresentada a capacidade resistente para o CT de 12,5 mm. O maior erro em relação aos experimentais foi de 1,12%, observado no modelo EXP. 12,5 mm – 3. Em comparação à média das capacidades resistentes experimentais, o erro foi de apenas 0,04%, considerado irrisório. Já em relação ao modelo numérico de Lima (2018), o erro foi de 0,97%. Esses resultados reforçam, mais uma vez, a eficiência do modelo desenvolvido.

Tabela 10: Capacidade Resistente do CT de 12,5 mm

CAPACIDADE RESISTENTE POR CT DE 12,5 mm (kN)					
MODELO	**EXP.**	**LIMA (2018)**	**MEF**	**MEF/EXP**	**MEF/LIMA (2018)**
EXP. 12,5 mm – 1	193,60	195,96	194,08	**0,25%**	**0,97%**
EXP. 12,5 mm – 2	192,60			**0,76%**	
EXP. 12,5 mm – 3	196,25			**1,12%**	
Média	194,15			**0,04%**	

Conforme o subitem 3.6.1, o modelo foi solucionado com o método dinâmico *Dynamic, Explicit*, que pode ser usado para análises quasi-estáticas se a energia cinética não exceder 10% da energia interna. A Tabela 11 mostra que, no início, o limite é ultrapassado, mas, ao final, a energia cinética se aproxima de 0%, validando a análise. No ABAQUS 2021, ALLIE e ALLKE representam, respectivamente, a energia interna e a energia cinética.

Tabela 11: Dados de Energia Cinética e Interna dos CTs

DADOS DE ENERGIA CINÉTICA E TOTAL $\left(\boldsymbol{kg.mm^2/s^2}\right)$								
CT de 8,0mm			**CT de 10,0mm**			**CT de 12,5 mm**		
ALLIE	**ALLKE**	**%**	**ALLIE**	**ALLKE**	**%**	**ALLIE**	**ALLKE**	**%**
2,50E+00	1,62E+00	64,88	7,95E+01	8,36E+00	10,51	9,11E+04	7,05E+03	7,74
1,78E+02	3,31E+01	18,57	4,65E+03	3,92E+02	8,43	2,99E+05	5,06E+03	1,69
1,34E+03	1,83E+02	13,64	2,95E+04	1,75E+03	5,95	5,13E+05	5,34E+03	1,04
6,31E+03	7,50E+02	11,88	1,20E+05	4,66E+03	3,87	7,78E+05	3,98E+03	0,51

Continuação

DADOS DE ENERGIA CINÉTICA E TOTAL $\left(kg.mm^2/s^2\right)$								
CT de 8,0mm			CT de 10,0mm			CT de 12,5 mm		
ALLIE	ALLKE	%	ALLIE	ALLKE	%	ALLIE	ALLKE	%
1,96E+04	2,13E+03	10,87	2,92E+05	7,17E+03	2,45	1,05E+06	3,37E+03	0,32
4,06E+04	4,28E+03	10,54	4,95E+05	8,83E+03	1,78	1,29E+06	2,83E+03	0,22
7,64E+04	7,45E+03	9,75	7,89E+05	1,04E+04	1,31	1,58E+06	2,51E+03	0,16
1,24E+05	1,10E+04	8,87	1,14E+06	1,25E+04	1,10	1,87E+06	2,28E+03	0,12
1,74E+05	1,42E+04	8,18	1,46E+06	1,53E+04	1,05	2,13E+06	2,21E+03	0,10
2,44E+05	1,81E+04	7,43	1,85E+06	1,56E+04	0,85	2,44E+06	1,98E+03	0,08
3,24E+05	2,17E+04	6,70	2,22E+06	1,33E+04	0,60	2,74E+06	2,04E+03	0,07
4,00E+05	2,43E+04	6,07	2,52E+06	1,02E+04	0,40	3,01E+06	1,90E+03	0,06
4,96E+05	2,67E+04	5,39	2,82E+06	6,93E+03	0,25	3,32E+06	1,65E+03	0,05
5,98E+05	2,84E+04	4,75	3,08E+06	4,33E+03	0,14	3,63E+06	1,77E+03	0,05
6,88E+05	2,92E+04	4,24	3,24E+06	2,41E+03	0,07	3,89E+06	1,68E+03	0,04
7,95E+05	2,89E+04	3,64	3,37E+06	9,24E+02	0,03	4,21E+06	1,68E+03	0,04
9,01E+05	2,77E+04	3,07	3,45E+06	2,35E+02	0,01	4,52E+06	1,59E+03	0,04
9,90E+05	2,59E+04	2,62	3,47E+06	2,69E+01	0,00	4,79E+06	1,60E+03	0,03
1,09E+06	2,32E+04	2,13	3,47E+06	1,59E+01	0,00	5,10E+06	1,46E+03	0,03
1,18E+06	2,00E+04	1,69	3,47E+06	1,02E+01	0,00	5,41E+06	1,46E+03	0,03
1,26E+06	1,69E+04	1,35	3,48E+06	9,96E+00	0,00	5,68E+06	1,44E+03	0,03
1,33E+06	1,34E+04	1,00	3,48E+06	1,06E+01	0,00	5,99E+06	1,44E+03	0,02
1,40E+06	9,98E+03	0,71	3,48E+06	6,66E+00	0,00	6,29E+06	1,29E+03	0,02
1,45E+06	7,35E+03	0,51	3,48E+06	1,22E+01	0,00	6,54E+06	1,25E+03	0,02
1,49E+06	4,70E+03	0,32	3,48E+06	6,17E+00	0,00	6,82E+06	1,71E+03	0,03
1,52E+06	2,63E+03	0,17	3,48E+06	1,19E+01	0,00	7,10E+06	1,63E+03	0,02
1,54E+06	1,36E+03	0,09	3,48E+06	4,71E+00	0,00	7,34E+06	1,60E+03	0,02
1,55E+06	4,61E+02	0,03	3,48E+06	1,28E+01	0,00	7,61E+06	1,70E+03	0,02
1,56E+06	7,77E+01	0,00	3,49E+06	5,50E+00	0,00	7,90E+06	1,77E+03	0,02
1,56E+06	3,47E+01	0,00	3,49E+06	1,33E+01	0,00	8,14E+06	1,81E+03	0,02

4.5. CUSTO COMPUTACIONAL

O custo computacional do modelo numérico pode ser avaliado em termos de tempo de processamento. Lima (2018) discretizou o CT isósceles com elementos sólidos, conforme apresentado no item 2.7. Com essa metodologia, o modelo numérico demandava aproximadamente 19 horas de processamento, representando um investimento significativo de tempo.

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho apresenta como diferencial a discretização do CT isósceles com elementos de barra (B31). Essa abordagem reduz o número de nós e elementos, resultando em um custo computacional menor. Na Tabela 12, são apresentadas as configurações das máquinas utilizadas e o tempo médio gasto para o processamento dos modelos.

O modelo desenvolvido nessa pesquisa demandou em média 70 s de processamento, o que representa 0,1% do tempo médio gasto pelo modelo de Lima (2018). Representando um ganho considerável no custo computacional e consequentemente na produtividade.

Tabela 12: Custo Computacional

Configurações dos computadores e Custo Computacional		
Modelo	**Configurações**	**Custo**
Lima (2018)	Processador Intel Core i5-2500, uma frequência de processamento 3.5GHz, e 8 Gigabytes de RAM	19 h
Autor	Processador Intel(R) Xeon(R) W-2255 CPU @ 3.70GHz, e 128 Gigabytes de RAM	70 s

5. ESTUDO PARAMÉTRICO

Neste capítulo, serão apresentados a construção dos modelos numéricos paramétricos, os resultados do estudo paramétrico e a proposição da equação para o cálculo da capacidade resistente. Todas as etapas foram desenvolvidas com o auxílio computacional, por meio de rotinas implementadas na linguagem de programação Python, utilizando técnicas de *Machine Learning* e Redes Neurais.

No desenvolvimento do estudo paramétrico, foram avaliados parâmetros geométricos e de resistência dos materiais. Os parâmetros geométricos incluem altura (H), ângulo de abertura (A) e diâmetro (D). Já os parâmetros de resistência referem-se ao concreto (f_{ck}) e ao aço (f_y). Na Tabela 13, são apresentados os valores estudados e a nomenclatura adotada.

Tabela 13: Valores Paramétricos

Valores Paramétricos				
Altura (H)	**Ângulo (A)**	**Diâmetro (D)**	**Resist. do Concreto (C)**	**Resist. do Aço (CA)**
70 mm H70 **90 mm H90** **110 mm H110** **130 mm H130**	**40° A40** **50° A50** **60° A60** **70° A70** **80° A80**	**8,0 mm D8** **10,0 mm D10** **12,5 mm D12**	**20 MPa C20** **25 MPa C25** **30 MPa C30** **35 MPa C35** **40 MPa C40** **45 MPa C45** **50 MPa C50**	**500 MPa CA50** **700 MPa CA70**

Com base na nomenclatura da Tabela 13, cada modelo paramétrico foi nomeado de acordo com suas características. Por exemplo, no modelo H70-A40-D8-C20-CA50, o conector possui 70 mm de altura, ângulo de abertura de 40°, aço de 8,0 mm, concreto com resistência à compressão de 20 MPa e aço com tensão de escoamento de 500 MPa. No total, foram analisados 840 modelos numéricos.

Conforme apresentado no Capítulo 3, foram validadas três metodologias, uma para cada diâmetro (D8, D10 e D12), portanto, os modelos paramétricos foram criados conforme a metodologia correspondente.

5.1. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS PARAMÉTRICOS

Os modelos numéricos paramétricos foram construídos seguindo a mesma metodologia apresentada no Capítulo 3, na qual o conector, discretizado com elementos de barra, é idealizado a partir da linha média do CT real. Inicialmente, foi definida a geometria para cada combinação de altura (H) e ângulo de abertura (A) do estudo paramétrico, resultando em 20 geometrias distintas.

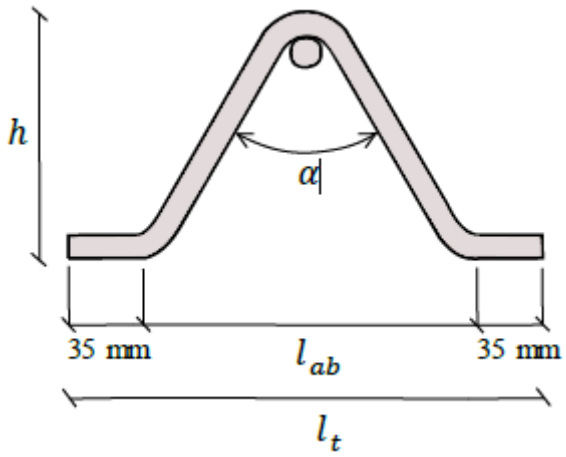
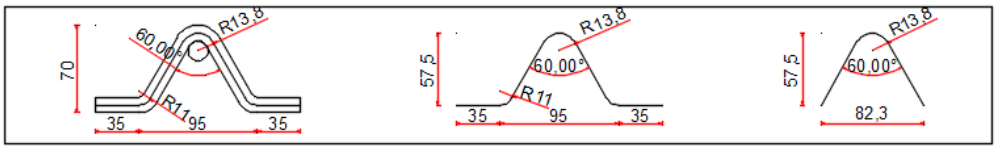


Figura 52: Parâmetros geométricos do CT (LIMA, 2018)

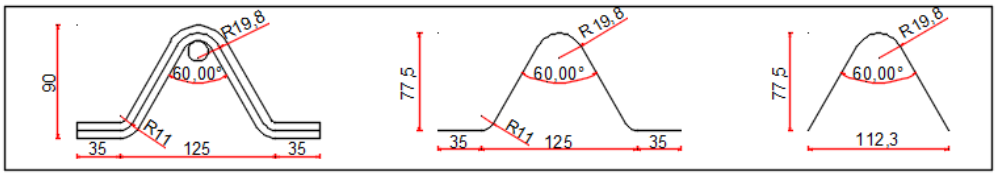
A metodologia para a criação da geometria segue o apresentado por Lima (2018) (Figura 52). Mantém-se, constante, a relação $\boldsymbol{h/l_{ab}}$ para garantir a curvatura em todos os modelos com o mesmo ângulo de abertura. O modelo base foi o desenvolvido por Barbosa (2016), H130-A60, (Figura 53b), que apresenta um valor de $\boldsymbol{h/l_{ab} = 0,72}$. A partir de valores próximos a esse, foram construídos os demais CTs com ângulo de abertura de 60° (Figura 53).

h/l_{ab}



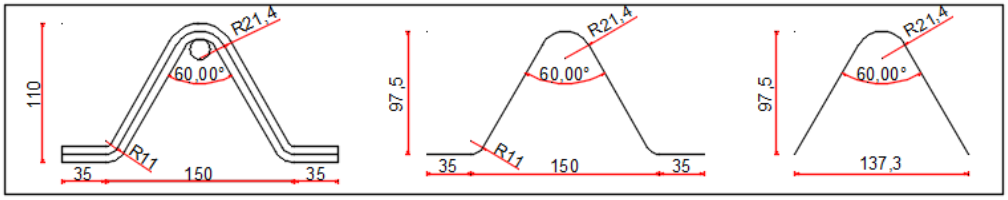
0,74

(a) H70-A60



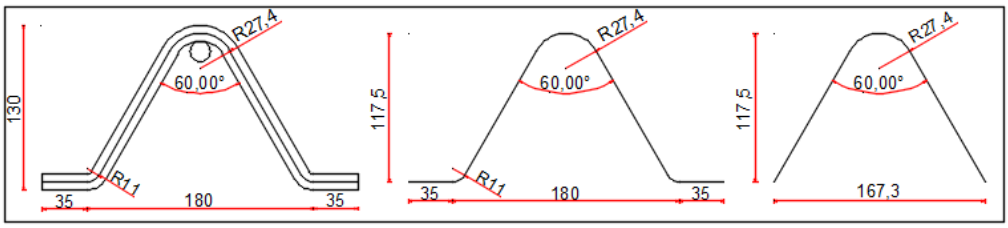
0,72

(b) H90-A60



0,73

(c) H100-A60



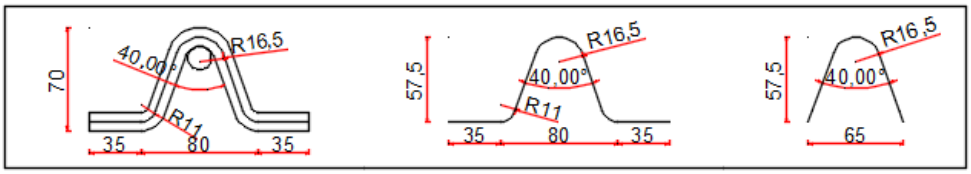
0,72

(d) H130-A60

Figura 53: CTs com ângulo de Abertura 60° e suas relações h/l_{ab} (mm)

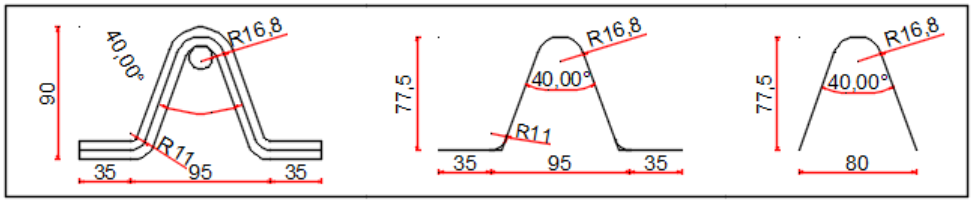
Para as demais geometrias, foram mantidas, aproximadamente, as relações h/l_{ab} apresentadas no trabalho de Lima (2018): para os CTs com 40°, 0,95; 50°, 0,82; 70°, 0,64; e 80°, 0,58. Por razões construtivas, foram considerados valores próximos a esses, aproximando-se l_{ab} para o inteiro mais próximo múltiplo de cinco. Nas Figuras 54 a 57, são apresentadas as geometrias dos conectores treliçados de 40°, 50°, 70° e 80°, respectivamente.

h/l_{ab}



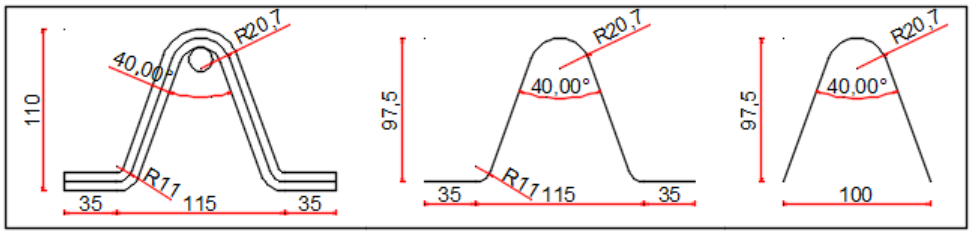
0,88

(a) H70-A40



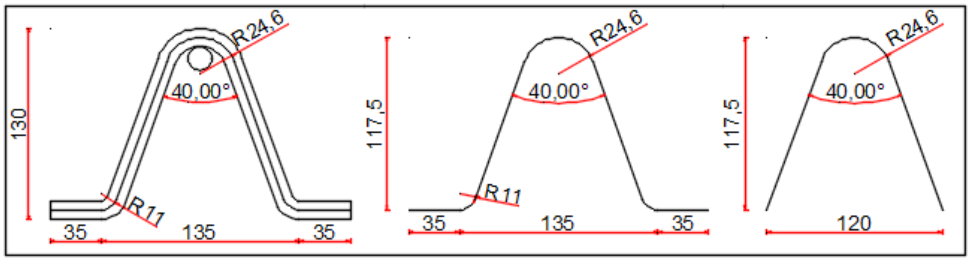
0,95

(b) H90-A40



0,96

(c) H110-A40

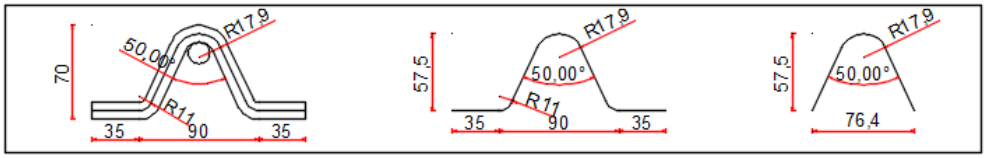


0,96

(d) H130-A40

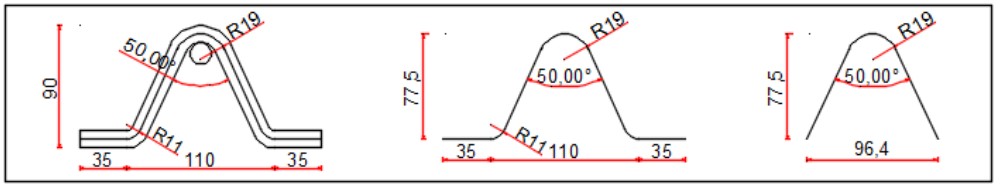
Figura 54: CTs com ângulo de Abertura 40° e suas relações h/l_{ab} (mm)

h/l_{ab}



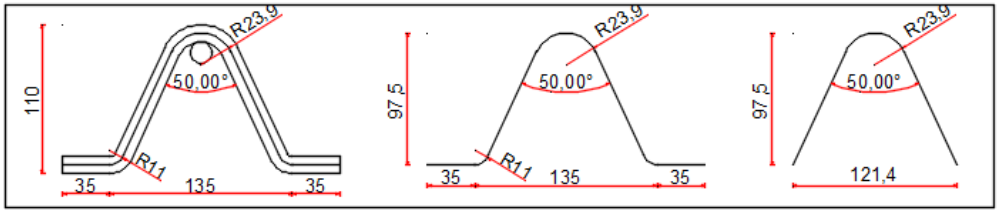
0,78

(a) H70-A50



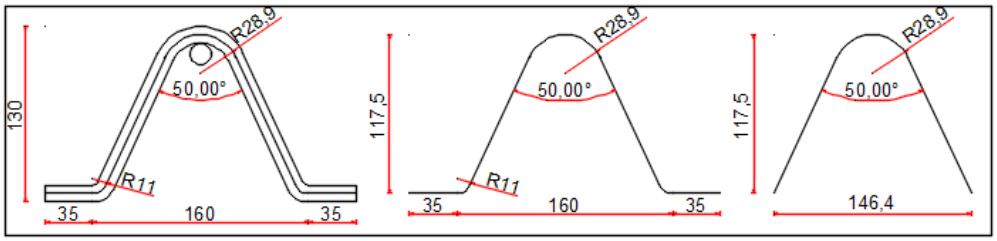
0,82

(b) H90-A50



0,82

(c) H110-A50

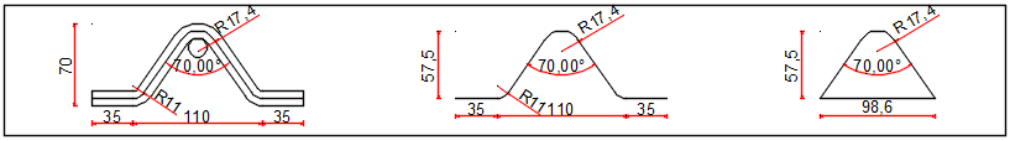


0,82

(d) H130-A50

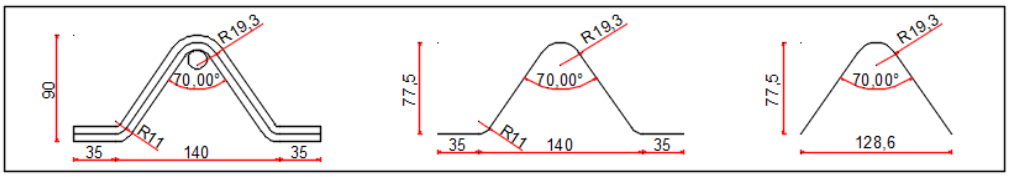
Figura 55: CTs com ângulo de Abertura 50° e suas relações h/l_{ab} (mm)

h/l_{ab}



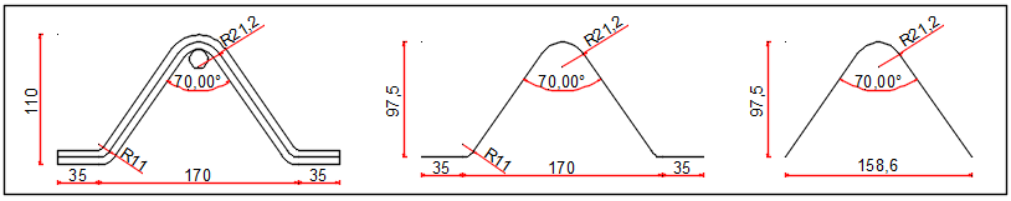
0,64

(a) H70-A70



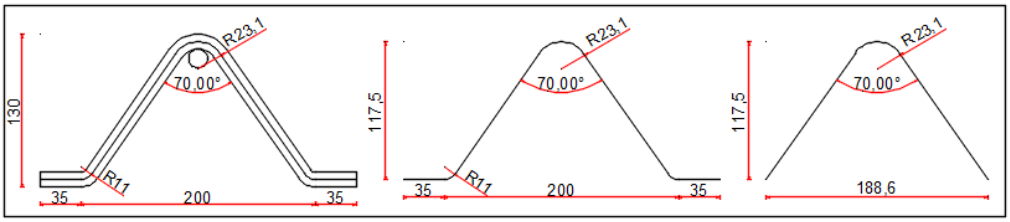
0,64

(b) H90-A70



0,65

(c) H110-A70

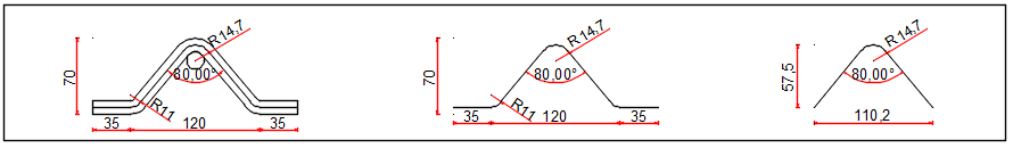


0,65

(d) H130-A70

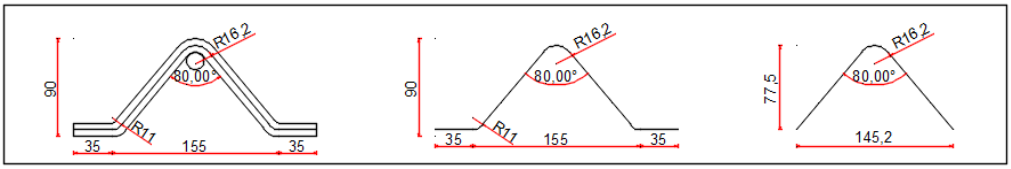
Figura 56: CTs com ângulo de Abertura 70° e suas relações h/l_{ab} (mm)

h/l_{ab}



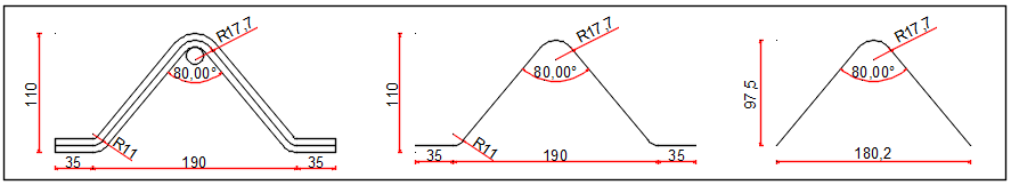
0,58

(a) H70-A80



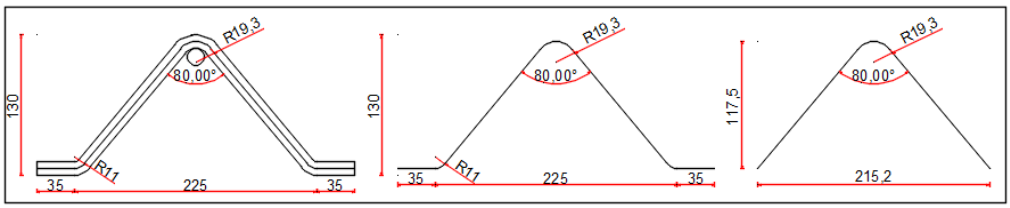
0,58

(b) H90-A80



0,58

(c) H110-A80



0,58

(d) H130-A80

Figura 57: CTs com ângulo de Abertura 80° e suas relações h/l_{ab} (mm)

A partir das geometrias apresentadas nas Figuras 53 a 57, foram construídos os modelos numéricos paramétricos. Conforme mencionado, foram utilizados algoritmos em Python para agilizar o processo de construção. As principais bibliotecas empregadas foram *abaqus* e *abaqusConstants*, que permitem abrir arquivos, alterar parâmetros dos materiais, modificar malhas, configurar *jobs*, além de executá-los e salvá-los.

Além dessas bibliotecas, também foi utilizado o módulo **os**, que possibilita interagir com o sistema operacional para criar diretórios, organizar pastas e percorrer arquivos, funções essenciais para a geração automática de diretórios específicos para cada arquivo. Na Figura 58, é apresentado um trecho de um dos códigos utilizados.

```python
# Função para alterar a malha no arquivo .cae
def alterar_malha(caminho_arquivo):
    try:
        # Abrir o arquivo .cae
        openMdb(pathName=caminho_arquivo)

        # Pegar o nome do modelo
        modelo_nome = mdb.models.keys()[0]  # Pega o primeiro modelo carregado

        # Acessar a parte 'LAJE' e alterar a malha
        parte_laje = mdb.models[modelo_nome].parts['LAJE']

        # Deletar a malha existente
        parte_laje.deleteMesh()

        # Criar uma nova malha com o tamanho especificado
        parte_laje.seedPart(deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1, size=15.0)

        # Gerar a nova malha
        parte_laje.generateMesh()

        # Salvar as mudanças no arquivo .cae
        mdb.save()

        # Imprimir mensagem de sucesso
        print("Tamanho da malha da parte 'LAJE' alterado para 15.0 e malha gerada no arquivo " + caminho_arquivo + ".")
```

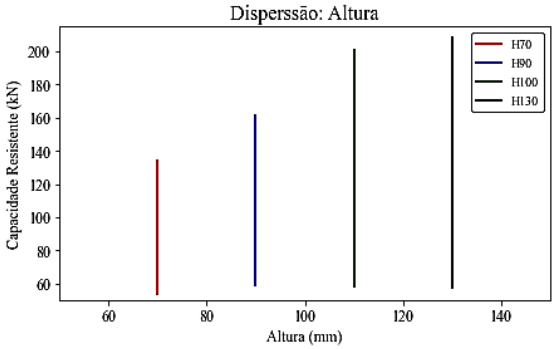
Figura 58: Parte de código em *Python* utilizado no estudo paramétrico

5.2. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA CAPACIDADE RESISTENTE

Após o processamento dos modelos numéricos, foram extraídos os dados referentes à força de reação na direção Z (RF-3) e ao deslocamento ao longo do eixo Z (U3), ambos disponibilizados pelo ABAQUS 2021. A variável RF-3 foi extraída no RP-1 (Figura 37), localizado na laje de concreto, e a variável U3 no ponto intermediário no perfil entre os conectores, no mesmo alinhamento. Essas variáveis são calculadas a cada incremento do processamento do modelo.

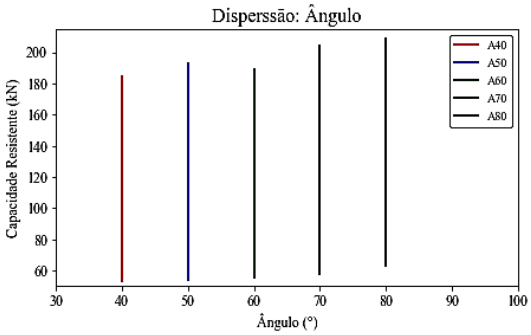
Após a coleta dos dados, foi realizado o primeiro processamento. Para cada modelo numérico, foi plotada a curva Carga x Deslizamento, a partir da qual se determinou a capacidade resistente, de acordo com a EN 1994-1:2004. Os valores coletados são referentes aos dois conectores simulados e em N, conforme Tabela 1. Assim, foi realizado um tratamento nos dados para expressarem a capacidade resistente por conector, em kN, unidade dos dados experimentais de Barbosa (2016) e Lima (2018). No Apêndice A, estão apresentadas as capacidades resistentes para cada CT estudado.

De posse dos valores de capacidade resistente (CR) dos 840 modelos, procedeu-se com a avaliação da influência dos parâmetros estudados. Inicialmente, são plotados gráficos de dispersão para cada um desses parâmetros. A Figura 59 apresenta os gráficos de dispersão para cada parâmetro: (a) Altura, (b) Ângulo de abertura, (c) Diâmetro, (d) Resistência do Concreto e (e) Resistência do aço.



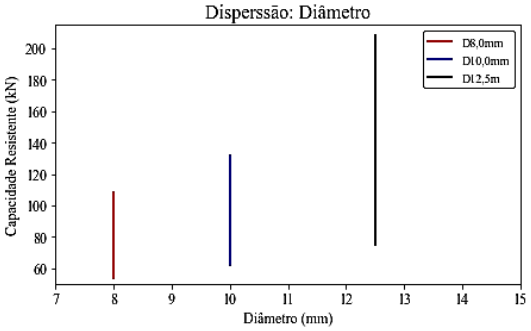
(a) Altura

(210 Modelos/Altura)



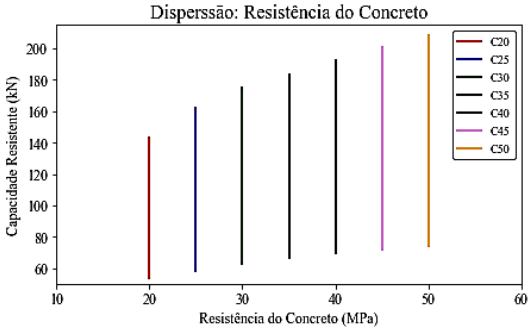
(b) Ângulo de abertura

(168 Modelos/Ângulo de Abertura)



(c) Diâmetro

(280 Modelos/Diâmetro)



(d) Resistência do Concreto

(120 Modelos/f_{ck})

(e) Resistência do aço

(420 Modelos/f_y)

Figura 59: Gráficos de Dispersão para cada parâmetro estudado

A partir dos gráficos da Figura 59, observa-se qualitativamente que todos os parâmetros influenciam diretamente a capacidade resistente (CR), ou seja, o aumento desses parâmetros resulta no crescimento da CR dos conectores treliçados. No entanto, a influência de cada parâmetro ocorre em diferentes magnitudes.

Nota-se que o diâmetro, diretamente relacionado à área de aço, é o parâmetro que mais contribui para o aumento da CR. Os maiores valores de CR para os diâmetros de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm foram 108,44 kN, 132,01 kN e 208,73 kN, respectivamente. Comparado ao CT de 8,0 mm, o de 10,0 mm apresenta um aumento de 21,77% na CR, enquanto o de 12,5 mm é 92,48% mais resistente. Isso evidencia a forte influência do diâmetro na CR. As Tabelas 14 e 15 apresentam essa mesma análise para os demais parâmetros.

Tabela 14: Influência dos Parâmetros Geométricos

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS			
Altura			
Classe	**Modelo**	**Máximo CR (kN)**	**Acréscimo (%)**
H70	H70-A80-D12-C50-CA70	134,40	-
H90	H90-A80-D12-C50-CA70	161,67	20,29%
H110	H110-A80-D12-C50-CA70	200,65	49,29%
H130	H130-A80-D12-C50-CA70	208,73	55,31%
Ângulo de Abertura			
Classe	**Modelo**	**Máximo CR (kN)**	**Acréscimo (%)**
A40	H130-A40-D12-C50-CA70	184,69	-
A50	H130-A50-D12-C50-CA70	192,55	4,26%
A60	H130-A60-D12-C50-CA70	188,85	2,25%
A70	H130-A70-D12-C50-CA70	204,43	10,69%
A80	H130-A80-D12-C50-CA70	208,73	13,02%
Diâmetro			
Classe	**Modelo**	**Máximo CR (kN)**	**Acréscimo (%)**
D8	H130-A80-D8-C50-CA70	108,44	-
D10	H130-A80-D10-C50-CA70	132,01	21,73%
D12	H130-A80-D12-C50-CA70	208,73	92,48%

A partir da Tabela 14, confirma-se que há uma relação diretamente proporcional entre os parâmetros geométricos e a capacidade resistente (CR), visto na Figura 59. A maior influência geométrica foi observada no diâmetro, que proporcionou um acréscimo de até 92,48% na CR, seguido pela altura (55,31%) e pelo ângulo de abertura (13,02%).

Tabela 15: Influência dos Parâmetros dos Materiais

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS			
Resistência do Concreto			
Classe	**Modelo**	**Máximo CR (kN)**	**Acréscimo (%)**
C20	H130-A80-D12-C20-CA70	142,95	-
C25	H130-A80-D12-C25-CA70	162,25	13,50%
C30	H130-A80-D12-C30-CA70	174,77	22,26%
C35	H130-A80-D12-C35-CA70	183,31	28,23%
C40	H130-A80-D12-C40-CA70	192,68	34,79%
C45	H130-A80-D12-C45-CA70	200,64	40,35%
C50	H130-A80-D12-C50-CA70	208,73	46,01%
Resistência do Concreto			
Classe	**Modelo**	**Máximo CR (kN)**	**Acréscimo (%)**
CA50	H130-A80-D12-C50-CA50	183,13	-
CA70	H130-A80-D12-C50-CA70	208,73	13,98%

A Tabela 15 apresenta os valores máximos de CR para as classes de resistência do concreto e do aço. Observa-se um incremento na capacidade resistente com o aumento dos valores de f_{ck} e f_y, resultado corroborado pela Figura 59. O parâmetro de resistência mais influente foi o concreto, que resultou em um acréscimo de 46,01% na CR, seguido pelo aço, com 13,98%.

Diante do exposto na Figura 59 e nas Tabelas 14 e 15, é possível estabelecer uma hierarquia de influência dos parâmetros na capacidade resistente (CR). O mais influente é o diâmetro, diretamente relacionado à área de aço, seguido pela altura, resistência do concreto, resistência do aço e, por fim, o ângulo de abertura.

5.3. REDE NEURAL

No desenvolvimento do estudo numérico paramétrico, foram coletados 840 dados, uma quantidade expressiva. No item 5.2, foram identificadas tendências de comportamento, contudo, as ferramentas utilizadas não foram suficientes para demonstrar a correlação entre as variáveis e a capacidade resistente (CR). Diante disso, optou-se por

treinar redes neurais com os dados coletados, a fim de determinar essas relações com maior precisão e capturar relações mais complexas.

Nessa fase do estudo, foram escolhidas três abordagens para redes neurais: *MLPRegressor,* do *scikit-learn*, e dois *frameworks* mais avançados, *TensorFlow/Keras* e *PyTorch*. Essas escolhas permitem comparar diferentes arquiteturas e estratégias de treinamento para prever a capacidade resistente. Elas foram escolhidas devido à sua flexibilidade, potência, velocidade e controle na arquitetura da rede. Além disso, foram as opções com maior quantidade de informações disponíveis, o que favoreceu sua adoção.

No treinamento das RNAs, algumas considerações foram feitas. Primeiro, o diâmetro não foi considerado diretamente, sendo substituído pela área da seção correspondente. Segundo, foi adicionada a variável módulo de elasticidade médio, (E_{cm}), conforme adotado no modelo constitutivo do concreto (ver subitem 3.4.3).

Essas escolhas foram feitas para alinhar a análise com as variáveis tradicionalmente utilizadas nas formulações da capacidade resistente, como na Equação 6 de Lima (2018). Embora, Lima (2018) utilize o módulo de elasticidade secante, (E_0), que é utilizado no modelo constitutivo adotado por ele.

A rede neural artificial (RNA) construída com o modelo *MLPRegressor*, da biblioteca *scikit-learn*, foi configurada com duas camadas ocultas contendo 64 e 32 neurônios. A função de ativação utilizada foi ReLU (*Rectified Linear Unit*), e o *solver* foi *Adam*, que ajusta os pesos da rede durante o treinamento. A RNA foi treinada por 2000 iterações.

Os dados foram padronizados com o uso do *StandardScaler* em todas as redes criadas, devido às diferenças de escala entre as variáveis. 20% do banco de dados foi reservado para teste e 80% para treino. Por fim, a rede forneceu a previsão da capacidade resistente (CR).

A rede neural artificial (RNA) construída com a biblioteca *TensorFlow/Keras* foi projetada com três camadas densas para realizar a tarefa de regressão. A primeira camada possui 64 neurônios, a segunda, 32 neurônios, e a terceira, com um único neurônio, é responsável por prever o valor contínuo, ou seja, a capacidade resistente.

Foi utilizada a função de ativação ReLU, amplamente aplicada em redes neurais. O modelo foi compilado com o *Adam*. Para a divisão do banco de dados, utilizou-se 20% para validação e 80% para treinamento, sendo o treinamento realizado ao longo de 500 épocas.

A RNA construída com a biblioteca *PyTorch* foi estruturada em três camadas densas. As duas primeiras camadas possuem 256 e 64 neurônios, respectivamente, e a última, com um neurônio, tem a função de prever a capacidade resistente (CR). Utilizou-se a mesma divisão dos dados 80/20 e a padronização com o *StandardScaler*. Foi adotada a função de ativação ReLU, o *solver Adam*, e a rede foi treinada por 5000 épocas.

A precisão das RNAs foi avaliada por meio das seguintes métricas: o MSE (Equação 11), que calcula a média dos quadrados dos erros entre os valores preditos e reais; o RMSE (Equação 12), que representa a raiz quadrada do MSE, expressando o erro na mesma unidade dos dados originais; o MAE (Equação 13), que determina a média das diferenças absolutas entre os valores preditos e reais; o MAPE (Equação 14), que calcula a média dos erros percentuais absolutos; e o coeficiente de determinação R^2 (Equação 15), que indica a proporção da variabilidade dos dados explicada pelo modelo.

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{11}$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \tag{12}$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|y_i - \hat{y}_i| \tag{13}$$

$$MAPE = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \tag{14}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y}_i)^2} \tag{15}$$

Onde:

N é o número total de amostras;

y_i é o valor real da amostra, obtido pelos modelos numéricos (kN);

$\hat{y}_i$ é o valor predito (kN);

$\bar{y}_i$ é a média dos valores reais;

MSE é dado na unidade da amostra ao quadrado, nesse caso $(kN)^2$;

$RMSE$, MAE e $MAPE$ são dados na unidade da amostra, nesse caso (kN);

R^2 é adimensional;

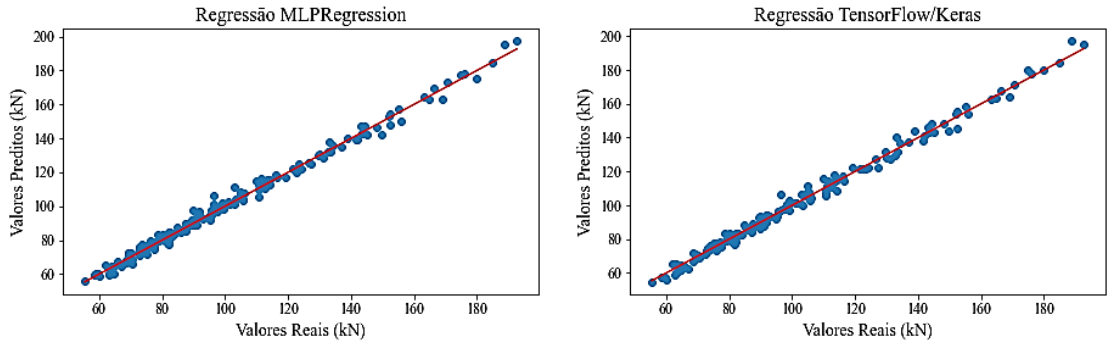
Após a definição das configurações das RNAs, foram calculadas as métricas de avaliação. A Tabela 13 apresenta os valores de cada métrica para cada RNA.

Tabela 16: Métricas de Avaliação das RNAs

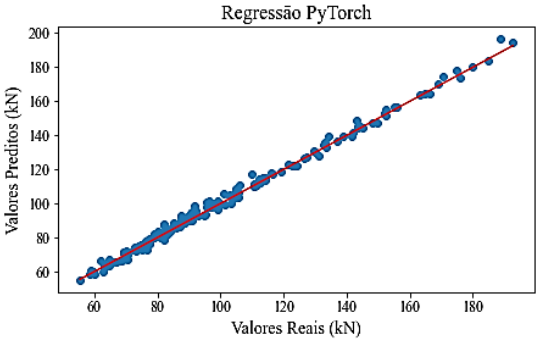
RNA	MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO				
	MSE (kN)²	RMSE (kN)	MAE (kN)	MAPE (kN)	R²
MLPRegressor	5.375	2.319	1.850	1.92%	0.995
TensorFlow/Keras	7.533	2.745	2.100	2.13%	0.992
PyTorch	4.761	2.182	1.643	1.70%	0.995

Observa-se que todas as RNAs construídas foram capazes de prever a capacidade resistente com alta precisão. No entanto, a RNA implementada com a biblioteca PyTorch apresentou os melhores resultados, obtendo os menores valores para as métricas MSE, RMSE, MAE e MAPE, além do maior valor de R². Dessa forma, essa RNA demonstrou a melhor capacidade preditiva para os valores de CR.

A Figura 60 apresenta a curva de regressão que relaciona os valores reais e preditos, evidenciando a precisão demonstrada na Tabela 13. Observa-se que a RNA construída com a biblioteca PyTorch obteve a melhor capacidade preditiva.



(a) *MLPRegressor* (b) *TensorFlow/Keras*

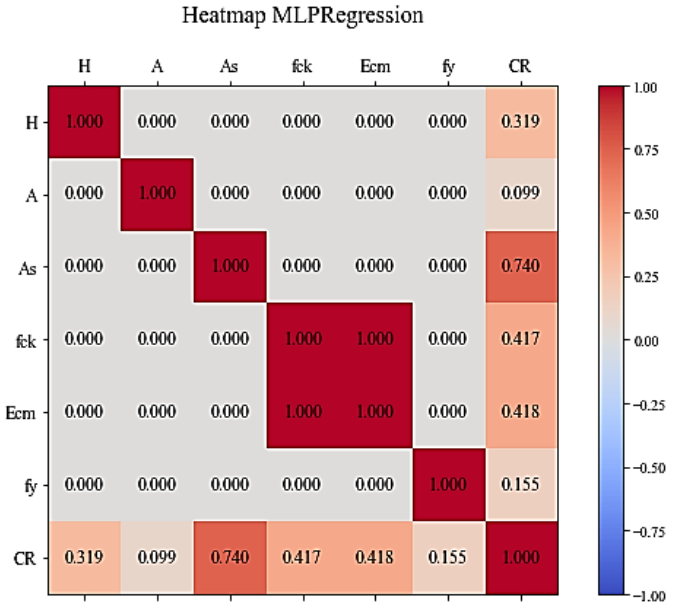


(c) *PyTorch*

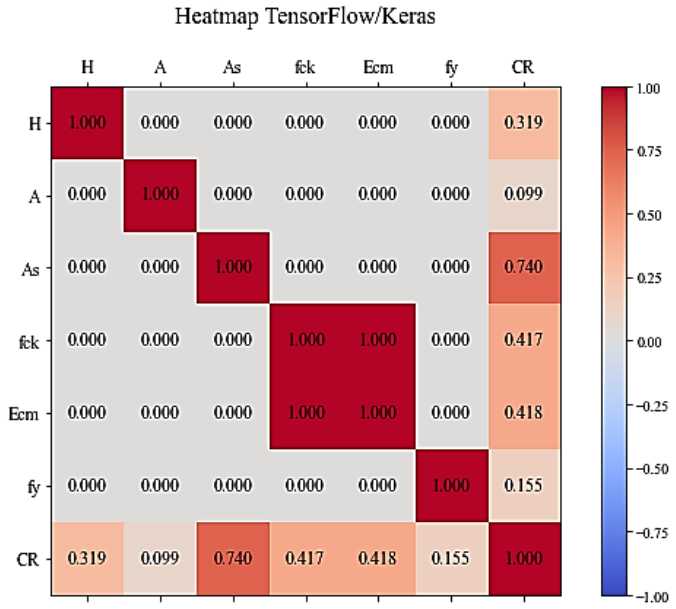
Figura 60: Regressões geradas pelas RNAs

Com a calibração e a avaliação da eficiência das RNAs, foi gerada a matriz de correlação entre as variáveis e a capacidade resistente. A partir dessa matriz, foram criados os *heatmaps* para cada RNA. Esse tipo de gráfico, além de exibir os valores numéricos de correlação, utiliza uma escala de cores para destacar os valores mais próximos de 1 ou -1, facilitando a interpretação das relações entre as variáveis.

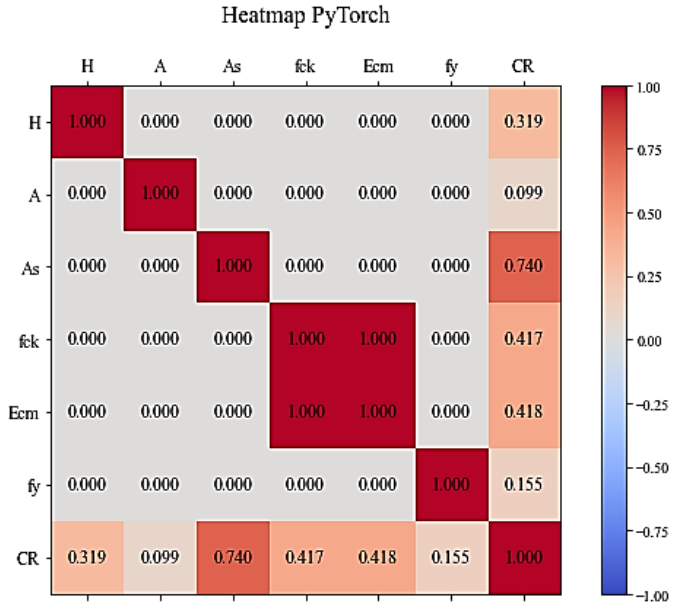
A Figura 61 apresenta os *heatmaps* com os valores de correlação entre as variáveis independentes e a capacidade resistente (CR). Observa-se uma uniformidade nos valores, indicando que, independentemente da RNA avaliada, a correlação entre as variáveis se mantém, confirmando os valores. Isso demonstra que todas as RNAs conseguem "aprender" as relações entre as variáveis, ainda que a precisão das previsões varie entre os modelos.



(a) *Heatmap* RNA *MLPRegressor*



(b) *Heatmap* RNA *TensorFlow/Keras*



(c) *Heatmap* RNA *PyTorch*

Figura 61: *Heatmaps* para as RNAs

Os valores 1,00 na diagonal da matriz de correlação representam a relação de uma variável consigo mesma, resultando sempre em correlação total. Além disso, observa-se que o gráfico também apresenta o valor 1,00 na relação entre f_{ck} e E_{cm}, o que indica correlação total entre essas variáveis, uma vez que E_{cm} é calculado a partir de f_{ck}.

Valores de 0,00 indicam ausência de correlação entre as variáveis. Por exemplo, a altura e o ângulo de abertura apresentam correlação nula, pois uma variável não depende da outra. Já os demais valores expressam a intensidade da relação entre cada variável e a capacidade resistente (CR).

Além disso, é possível inferir o grau de importância de cada variável em relação à capacidade resistente (CR). Quanto mais próximo de 1 ou -1 for o valor da correlação, maior será sua influência, seja de forma direta (correlação positiva) ou inversa (correlação negativa).

Nota-se que todas as correlações são positivas, indicando que um aumento no valor de qualquer variável resulta em um aumento na CR. Essa tendência está em conformidade com a Figura 59, na qual os gráficos de dispersão evidenciaram o mesmo comportamento.

Com os valores apresentados na Figura 61, é possível estabelecer um ranking das variáveis mais influentes na CR. A variável As (área de aço) destaca-se como a mais impactante, com um valor de correlação de 0,740. Em seguida, aparecem E_{cm} (0,418), f_{ck} (0,417), H (altura, 0,319), e f_y (resistência do aço, 0,155). Por fim, o ângulo de abertura A (0,099) é a variável com menor influência.

Esse resultado está em consonância com o observado na Tabela 11, a partir da qual foi possível estabelecer um ranking de influência das variáveis. No entanto, há uma divergência: enquanto a análise estatística indicou que a altura (H) é a segunda variável mais influente, nas RNAs esse papel foi atribuído ao E_{cm}.

Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que, na análise estatística, o módulo de elasticidade médio (E_{cm}) não foi considerado, o que impactou a ordem de influência das variáveis. No entanto, a hierarquia das demais variáveis permaneceu inalterada, com a área de aço (As) sendo a mais influente e o ângulo de abertura (A) a menos influente.

6. EQUAÇÃO PARA O CÁLCULO DA CAPACIDADE RESISTENTE

A última etapa do estudo consiste em propor uma equação para o cálculo da capacidade resistente do conector treliçado isósceles. A seguir são apresentadas as etapas para a proposição da equação. Criação do banco de dados e proposição da equação e métricas de avaliação.

6.1. BANCO DE DADOS

Inicialmente, no estudo paramétrico, foram analisados os seguintes valores para cada variável: altura (70, 90, 110 e 130 mm), ângulo de abertura (40°, 50°, 60°, 70° e 80°), diâmetro (8,0, 10,0 e 12,5 mm), resistência do concreto (20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 MPa) e resistência do aço (500 e 700 MPa). Isso resultou em um total de 840 modelos/amostras.

Essas amostras, para o valor da capacidade resistente, serviram para o treinamento das RNAs (item 5.3). Com as RNAs treinada foi construído um novo banco de dados, que abrangesse toda a faixa de valores para as variáveis. Como observado, a rede neural criada com a biblioteca *PyTorch* foi a que apresentou as melhores métricas de avaliação. Portanto, essa rede foi escolhida para gerar um novo banco de dados.

Para a geração do novo banco de dados a partir da RNA, foram adotados valores intermediários para cada variável, ampliando assim a variedade de valores e, consequentemente, o número de amostras. Por exemplo, para a variável altura, foram considerados valores entre 70 mm e 130 mm, valores extremos dos CTs, com incrementos de 1 mm, totalizando 61 valores distintos. Na Figura 62, são apresentados os novos valores das variáveis.

```
# Definindo as variáveis independentes
H_values = np.array([70.0, 71.0, 72.0, 73.0, 74.0, 75.0, 76.0, 77.0, 78.0, 79.0,
                     80.0, 81.0, 82.0, 83.0, 84.0, 85.0, 86.0, 87.0, 88.0, 89.0,
                     90.0, 91.0, 92.0, 93.0, 94.0, 95.0, 96.0, 97.0, 98.0, 99.0,
                     100.0, 101.0, 102.0, 103.0, 104.0, 105.0, 106.0, 107.0, 108.0,
                     109.0, 110.0, 111.0, 112.0, 113.0, 114.0, 115.0, 116.0, 117.0,
                     118.0, 119.0, 120.0, 121.0, 122.0, 123.0, 124.0, 125.0, 126.0,
                     127.0, 128.0, 129.0, 130.0])
A_values = np.array([40.0, 41.0, 42.0, 43.0, 44.0, 45.0, 46.0, 47.0, 48.0, 49.0,
                     50.0, 51.0, 52.0, 53.0, 54.0, 55.0, 56.0, 57.0, 58.0, 59.0,
                     60.0, 61.0, 62.0, 63.0, 64.0, 65.0, 66.0, 67.0, 68.0, 69.0,
                     70.0, 71.0, 72.0, 73.0, 74.0, 75.0, 76.0, 77.0, 78.0, 79.0, 80.0])
Act_values = np.array([100.53, 106.91, 113.49, 120.26, 127.23, 134.40, 141.76, 149.32,
                       157.08, 165.03, 173.18, 181.53, 190.07, 198.80, 207.74, 216.87,
                       226.19, 235.72, 245.44])
fck_values = np.array([20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35, 37.5, 40, 42.5, 45, 47.5, 50])
Ecm_values = np.array([28847.6, 29681.8, 30471.58, 31222.41, 31938.77, 32624.36, 33282.28, 33915.18,
                       34525.29, 35114.57, 35684.71, 36237.2, 36773.33])
fy_values = np.array([500.0, 700.0])
```

Figura 62: Novos valores das variáveis independentes

Foram avaliados: 61 valores para altura, 41 para ângulo de abertura, 19 para área de aço, 13 combinações de resistência do concreto e módulo de elasticidade médio (f_{ck} e E_{cm}) e 2 para resistência do aço. Isso resultou em um total de 1.235.494 amostras de capacidade resistente, um número 1.400 vezes maior que o do banco de dados original.

É importante comentar que não foram avaliados novos valores para a resistência do aço, pois em um teste prévio observou-se que o modelo não conseguia prever adequadamente o comportamento da capacidade resistente (CR) com a variação de f_y, considerando uma variação parabólica positiva. Ou seja, valores intermediários entre 500 e 700 MPa resultaram em CRs menores, um comportamento incoerente com o observado nas matrizes de correlação e os gráficos de dispersão. Dessa forma, optou-se por manter os mesmos valores para a resistência do aço utilizados no estudo paramétrico.

6.2. PROPOSTA DA EQUAÇÃO E MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

Inicialmente, foram consideradas duas equações da literatura como referência para definir o formato da equação a ser proposta. A primeira, Equação 16, é adotada pelas normas ABNT NBR 8800:2024 e AASHTO LRFD:2004 para o cálculo da capacidade resistente de conectores do tipo *stud bolt*. Essa equação foi originalmente proposta por Ollgaard *et al*., (1971) para conectores *stud bolt* em vigas mistas com laje maciça de concreto. A segunda, Equação 17, foi desenvolvida por Lima (2018) para estimar a capacidade resistente do CT isósceles com altura de 90 mm e ângulo de abertura de 80°.

$$Q_{st} = 0{,}5A_{st}\sqrt{f_c' E_c} \tag{16}$$

$$Q_{CT} = 0{,}695A_{CT}\sqrt{f_{cm} E_o} \tag{17}$$

Onde:

Q_{st} é a capacidade resistente do *stud bolt* (kN);

A_{st} é a área da seção transversal do conector (m²);

f_c' é a resistência à compressão do concreto (MPa);

E_c é o Módulo de Elasticidade do concreto (MPa);

Q_{CT} é a resistência do CT (kN);

A_{CT} é a soma das áreas da seção transversal das duas hastes do CT (m²);

f_{cm} é a resistência à compressão do concreto (MPa);

E_o é o Módulo de Elasticidade secante do concreto (MPa).

Ambas formulações são simples e práticas de aplicação e podem ser reescritas como um produto de potências. Conforme está apresentada na Equação 18 e 19.

$$Q_{st} = 0{,}5.(A_{st})^1.(f_c')^{0{,}5}.(E_c)^{0{,}5} \tag{18}$$

$$Q_{CT} = 0{,}695.(A_{CT})^1.(f_{cm})^{0{,}5}.(E_o)^{0{,}5} \tag{19}$$

Com base nessa observação, propôs-se inicialmente a Equação 20, expressa como o produto das seis variáveis independentes e um coeficiente α. Essa equação foi implementada utilizando o método *curve_fit*, que otimiza os expoentes e o coeficiente α ajustando a curva aos dados. Esse procedimento é semelhante a uma regressão não-linear, porém oferece ao usuário um maior controle sobre a forma da equação.

$$Q_{CT} = \alpha.{A_{ct}}^a A^b H^c {f_y}^d {f_{ck}}^e {E_{cm}}^f \tag{20}$$

Onde:

Q_{ct} é a capacidade resistente do CT isósceles (N);

A_{ct} é a área da seção transversal das duas hastes do CT (mm²);

A é o ângulo de abertura;

H é a altura do conector (mm);

f_y é a resistência do aço (MPa);

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto (MPa);

E_{cm} é o Módulo de Elasticidade médio do concreto (MPa).

A Equação 21 apresenta os expoentes e o coeficiente que melhor representam o conjunto de dados, conforme determinados pelo algoritmo implementado com o *curve_fit*. No mesmo processo de ajuste, são calculadas métricas para avaliar a precisão da equação, expressas em kN. Devido ao grande volume de amostras, essas métricas indicam que a equação proposta consegue representar satisfatoriamente o comportamento dos dados.

O erro médio obtido foi de 6,03%, um resultado satisfatório considerando o coeficiente de segurança de 1,25 adotado para conectores de cisalhamento. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) também apresentou um valor satisfatório. A análise dos expoentes indicou que o ângulo de abertura foi a variável com menor contribuição, apresentando o menor expoente. Com base nisso, foi realizado um novo teste excluindo essa variável.

$$Q_{ct} = 0{,}0047 {A_{ct}}^{0{,}6461} A^{0{,}1660} H^{0{,}4731} {f_y}^{0{,}2427} {f_{ck}}^{0{,}2427} {E_{cm}}^{0{,}7961} \quad (21)$$

Métricas de avaliação:

R^2: 0,90 / **MSE**: 50,94 kN / **RMSE**: 7,14 kN / **MAE**: 5,65 kN / **MAPE**: 6,03%

A Equação 22 apresenta os resultados obtidos e as respectivas métricas de desempenho. A exclusão do ângulo de abertura resultou em pequenas alterações nas métricas e nos expoentes, confirmando sua menor influência em comparação com as demais variáveis e justificando sua remoção.

$$Q_{ct} = 0{,}0118 Act^{0{,}6433} H^{0{,}4730} fy^{0{,}2417} fck^{0{,}2498} Ecm^{0{,}7716} \quad (22)$$

Métricas de avaliação:

R^2: 0,89 / **MSE**: 61,28 kN / **RMSE**: 7,83 kN / **MAE**: 6,27 kN / **MAPE**: 6,58%

Inicialmente, os expoentes das variáveis f_y e f_{ck} foram arredondados para 1/3, os expoentes de H e A_{ct} para 1/2 e o expoente de E_{cm} para 1, resultando na Equação 23. No

entanto, esse arredondamento teve um impacto negativo nas métricas, reduzindo a precisão da equação.

Como E_{cm} apresentou o maior expoente na Equação 21, isso indica que essa é a variável mais influente, motivando a calibração do seu expoente. Em um novo teste, foi adotado o expoente 1/2 para E_{cm}, resultando na Equação 24. As métricas de desempenho apresentaram uma precisão superior à da Equação 23, aproximando-se dos valores obtidos na Equação 22, reforçando a importância dessa variável no modelo.

$$Q_{ct} = 0.00084{A_{ct}}^{0,5} H^{0,5} {f_y}^{1/3} {f_{ck}}^{1/3} {E_{cm}}^{1} \quad (23)$$

Métricas de avaliação:

R²: 0,83 / **MSE**: 92,20 kN / **RMSE**: 9,60 kN / **MAE**: 7,49 kN / **MAPE**: 7,66%

$$Q_{ct} = 0{,}154{A_{ct}}^{0,5} H^{0,5} {f_y}^{1/3} {f_{ck}}^{1/3} {E_{cm}}^{0,5} \quad (24)$$

Métricas de avaliação:

R²: 0,86 / **MSE**: 75,88 kN / **RMSE**: 8,71 kN / **MAE**: 6,72 kN / **MAPE**: 6,78%

Com o objetivo de obter a equação que melhor se ajusta aos dados, foi realizado um teste utilizando o *curve_fit*, no qual os expoentes das variáveis da Equação 21 (A_{ct}, A, H, f_y, f_{ck} e E_{cm}) foram analisados. Buscando propor uma equação o mais simples possível, foram escolhidos os seguintes valores para teste nos expoentes: 0, 1/2, 1/3, 1 e 2. Dessa forma, a equação teria expoentes inteiros ou raízes frequentemente utilizadas em equações de engenharia, como a quadrada e a cúbica.

Dessa forma, foram avaliadas um total de 5^6 combinações possíveis de expoentes, totalizando 15.625 equações. Para cada uma delas, foram calculadas as métricas de avaliação e o valor de α, juntamente com seu respectivo intervalo de confiança de 95%. Ao fim dessas análises, a Equação 25 foi proposta como a que melhor se ajustou aos dados.

$$\boldsymbol{Q_{ct} = 0,8743.{A_{ct}}^{1/2}.H^{1/2}.\sqrt[3]{f_y.f_{ck}.E_{cm}}} \quad (25)$$

Onde:

Q_{ct} é a capacidade resistente do CT isósceles (N);

$0{,}8743$ constante com unidade $mm^{1/2}$;

A_{ct} é a área da seção transversal das duas hastes do CT (mm^2);

H é a altura do conector (mm);

f_y é a resistência do aço (MPa);

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto (MPa);

E_{cm} é o Módulo de Elasticidade médio do concreto (MPa).

Inicialmente, foi realizada uma análise dimensional para garantir a consistência da equação. As variáveis envolvidas na equação possuem as seguintes dimensões: H tem dimensão de comprimento, [L], A_{ct} de área, [L^2], Q_{ct} tem dimensão de força, [ML/T^2] e f_y, f_{ck} e E_{cm} de tensão, [$(ML/T^2)/L^2$], M é massa e T é tempo. Na Tabela 17 está apresentada a análise dimensional. Foi determinado que, para garantir a consistência dimensional a constante $[\alpha]$ deve ter dimensão [$L^{1/2}$], ou seja, a raiz quadrada do comprimento, no caso da Equação 25, $mm^{1/2}$.

Tabela 17: Análise dimensional da Equação proposta

$$Q_{ct} = 0{,}8743.{A_{ct}}^{1/2}.H^{1/2}.\sqrt[3]{f_y.f_{ck}.E_{cm}}$$

$$\frac{ML}{T^2} = [\alpha].[L^2]^{1/2}.L^{1/2}.\sqrt[3]{\frac{ML/T^2}{L^2}.\frac{ML/T^2}{L^2}.\frac{ML/T^2}{L^2}} = [\alpha].L.L^{1/2}\sqrt[3]{\left(\frac{ML/T^2}{L^2}\right)^3}$$

$$\frac{ML}{T^2} = [\alpha].L.L^{1/2}.\left(\frac{ML/T^2}{L^2}\right) = [\alpha].L.L^{1/2}.\frac{M}{LT^2} = [\alpha]L^{1/2}\frac{M}{T^2}$$

$$L = [\alpha]L^{1/2} \;\Rightarrow\; \boldsymbol{[\alpha] = L^{1/2}}$$

A Equação 25 obteve as seguintes métricas de desempenho: R^2 = 0,86, MSE = 75,94 kN, RMSE = 8,71 kN, MAE = 6,71 kN e MAPE = 6,78%. Observa-se que esses valores são próximos aos da Equação 21, que apresentou a melhor precisão, embora com desempenho ligeiramente inferior.

Destaca-se o valor de MAPE (6,78%), que representa a média absoluta do erro entre os valores reais (banco de dados) e os valores previstos. Esse resultado é bastante satisfatório, especialmente considerando o coeficiente de segurança dos conectores de cisalhamento, que é 1,25.

Além disso, o maior erro absoluto registrado foi de 33,30%, ocorrido no modelo H126-A67-D8-C50-CA50. Na Tabela 18 apresenta-se a distribuição da quantidade de modelos em cada faixa de erro, variando de 0 a 35%, com intervalos de 5%. Nota-se que apenas uma pequena parcela dos modelos ultrapassa o erro de 25%, enquanto a grande maioria apresenta erro inferior a 10%, o que atesta a eficiência da equação.

Tabela 18: Distribuição das amostras por faixa de erro

DISTRIBUIÇÃO DAS AMOSTRAS		
Faixa de Erro	**Quantidade**	**%**
0 a 5%	544652	44,08%
5 a 10%	399718	32,35%
10 a 15%	194585	15,75%
15 a 20%	73039	5,91%
20 a 25%	19211	1,55%
25 a 30%	3953	0,32%
30 a 35%	336	0,03%

O coeficiente α foi ajustado para 0,8743, conforme mostrado na Equação 25. Para esse valor, foi calculado o intervalo de confiança com um nível de confiança de 95%, resultando em (0,8742; 0,8744). O intervalo reduzido, aliado a uma boa distribuição dos dados, indica uma estimativa precisa para α.

Em relação à Eq. 6 de Lima (2018), a equação proposta neste trabalho insere o termo H (altura do conector), tornando-se mais abrangente, uma vez que a equação de Lima (2018) era restrita a conectores com 90 mm de altura e ângulo de abertura de 80°. A Eq. 25, desenvolvida neste estudo, contempla alturas entre 70 e 130 mm e ângulos de abertura entre 40° e 80°.

Outro aspecto relevante em comparação à Eq. 6 é a inclusão da resistência do aço (f_y) na formulação. Com isso, considera-se também a estricção do aço como modo de ruptura, além do esmagamento do concreto. Essa abordagem unificada simplifica o

processo de cálculo, em comparação com as duas formulações distintas para o conector *stud bolt* propostas pela ABNT NBR 8800:2024 (Eq. 3 e 4), que tratam os modos de ruptura separadamente. Dessa forma, a Eq. 25 não apenas abrange um número maior de configurações geométricas, mas também incorpora, em uma única formulação, diferentes processos físicos complexos.

A Equação 25 foi aplicada ao banco de dados inicial (840 amostras), resultando nas métricas: $R^2 = 0,85$, MSE = 134,88 kN, RMSE = 11,61 kN, MAE = 8,84 kN e MAPE = 8,61%. Embora a precisão tenha sido inferior à observada no banco de dados da rede neural, o modelo ainda apresentou bom desempenho ($R^2 = 0,85$) e erro na mesma magnitude (MAPE = 8,61%). A distribuição dos erros (Tabela 19) mostrou que a maioria das amostras teve erro inferior a 10%.

Tabela 19: Distribuição das amostras por faixa de erro para o banco de dados inicial

DISTRIBUIÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O BANCO DE DADOS INICIAL					
Faixa de Erro	**Quantidade**	**%**	**Faixa de Erro**	**Quantidade**	**%**
0 a 5%	271	32,26%	20 a 25%	33	3,93%
5 a 10%	274	32,62%	25 a 30%	9	1,07%
10 a 15%	176	20,95%	30 a 35%	3	0,36%
15 a 20%	73	8,69%	35 a 40%	1	0,12%

7. CONCLUSÕES

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões da pesquisa, organizadas em duas partes. A primeira, no item 6.1, aborda as conclusões sobre o modelo numérico desenvolvido com a discretização do CT utilizando elementos de barra (B31). A segunda parte trata das conclusões relacionadas ao estudo paramétrico realizado e à proposição da equação.

7.1. CONCLUSÕES SOBRE A VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O presente trabalho teve como objetivo geral estudar a influência dos parâmetros geométricos e dos materiais na capacidade resistente do CT isósceles. Para realizar esse estudo paramétrico, era necessário desenvolver um modelo numérico. No entanto, as metodologias existentes demandavam um custo computacional elevado, inviabilizando a execução dos 840 modelos testados.

Por essa razão, o trabalho estabeleceu como primeiro objetivo desenvolver um modelo numérico tridimensional não linear, via MEF, do ensaio *push-out* com o CT isósceles no software ABAQUS 2021, que demandasse um custo computacional menor em comparação aos modelos disponíveis na literatura.

As curvas Carga x Deslizamento deste estudo mostraram boa concordância com os resultados experimentais de Barbosa (2016) e numéricos de Lima (2018), reproduzindo os regimes elástico e plástico e simulando bem a perda de resistência, principalmente nos CTs de 8,0 e 10,0 mm. D As curvas deste estudo mostraram rigidez levemente superior às da literatura, mantendo-se dentro da região das curvas experimentais;

A configuração deformada dos CTs mostrou boa concordância com a literatura. O uso do elemento de barra (B31) destacou uma haste em tração e outra em compressão, alinhando-se com os modelos experimental e numérico;

A distribuição das tensões de *von Misses* nos CTs e na laje também apresentou valores condizentes com os observados na literatura. Nos CTs, as maiores tensões ocorreram na base das hastes, atingindo valores superiores à tensão de escoamento, o que indica que essa região é um ponto crítico para a ruptura do conector. Esse resultado está em concordância com o modo de ruptura observado por Barbosa (2016), que identificou a ruptura na base das hastes do CT. Além disso, o modelo numérico de Lima (2018), discretizado com elementos sólidos, mostrou o mesmo comportamento;

Na laje, a distribuição das tensões de *von Misses* também se mostrou eficiente e condizente com os resultados experimentais. Observou-se uma concentração de tensão na região próxima à base dos CTs, ultrapassando a resistência à compressão do concreto, o que pode indicar um local de esmagamento. Esse comportamento foi observado por Barbosa (2016), que concluiu que houve esmagamento do concreto na região próxima à base dos conectores durante o ensaio experimental. Resultado semelhante foi obtido por Lima (2018);

Em relação à capacidade resistente, os resultados mostraram-se muito satisfatórios. Com exceção do experimental EXP. 10,0 mm – 2 (6,56%), todos os demais erros ficaram abaixo de 5%, demonstrando a robustez do modelo numérico desenvolvido. Em comparação ao modelo numérico de Lima (2018), os erros foram de 2,02%, 0,60% e 0,97% para os CTs de 8,0, 10,0 e 12,5 mm, respectivamente, reforçando a precisão do modelo. Em relação à média dos valores experimentais, os erros foram de 1,75%, 0,53% e 0,04% para os CTs de 8,0, 10,0 e 12,5 mm, respectivamente, resultados altamente satisfatórios;

Em relação à energia do modelo, a energia cinética manteve-se abaixo de 10% da energia interna, validando a adoção do método *Dynamic, Explicit* para a solução do modelo;

Por fim, a adoção do elemento de barra (B31) na discretização do conector, em vez do elemento sólido utilizado por Lima (2018), resultou em um custo computacional de 70 segundos, o que representa 0,1% do tempo médio do modelo de Lima (2018).

Diante do exposto, fica evidente que o modelo numérico atendeu às expectativas e alcançou o objetivo proposto. Ele reduz significativamente o custo computacional sem comprometer a qualidade da análise. Dessa forma, conclui-se que essa primeira etapa foi desenvolvida com êxito.

7.2. CONCLUSÕES ACERCA DO ESTUDO PARAMÉTRICO E EQUAÇÃO PROPOSTA

Após a validação do modelo numérico, foi realizado um estudo paramétrico, variando os seguintes parâmetros: os geométricos (altura – H, ângulo de abertura – A e diâmetro – D) e os relacionados aos materiais (resistência do concreto – f_{ck} e resistência do aço – f_y).No total, foram desenvolvidos 840 modelos numéricos no software ABAQUS 2021.

Inicialmente, analisou-se a influência dessas variáveis na capacidade resistente do conector treliçado isósceles por meio de gráficos de dispersão. A partir dessa análise, verificou-se que o diâmetro, diretamente relacionado à área de aço, é a variável de maior influência, resultando em um aumento de até 94% na capacidade resistente. Em seguida, destacaram-se as variáveis altura (55,31%), resistência do concreto (46,01%), resistência do aço (13,98%) e, por fim, o ângulo de abertura (13,02%).

Com os dados do estudo paramétrico, foram treinadas três redes neurais: *MLPRegressor*, do *scikit-learn*, e duas implementações em frameworks mais avançados, *TensorFlow/Keras e PyTorch*. O desempenho das redes foi avaliado por meio das métricas MSE, RMSE, MAE, MAPE e R^2.A RNA que apresentou o melhor ajuste da curva foi a desenvolvida em *PyTorch*, com R^2 de 0,995.A rede neural baseada no *MLPRegressor* também atingiu R^2 de 0,995, enquanto a do *TensorFlow/Keras* obteve R^2 de 0,992.

A partir das redes neurais, foram gerados gráficos com os valores da matriz de correlação entre as variáveis e a capacidade resistente (CR).Os coeficientes de correlação encontrados foram: área de aço – As (0,74), módulo de elasticidade do concreto – E_{cm} (0,418), resistência característica do concreto – f_{ck} (0,417), altura – H (0,319), resistência do aço – f_y (0,155) e ângulo de abertura – A (0,099).

Esses valores confirmam a hierarquia de influência das variáveis na capacidade resistente, evidenciando que a área de aço é a variável mais significativa, enquanto o ângulo de abertura exerce a menor influência. Os resultados corroboram a análise gráfica inicial, que indicou o diâmetro (área de aço) como o parâmetro mais relevante e o ângulo de abertura como o de menor impacto.

Dessa forma, além de demonstrar alta precisão na previsão da capacidade resistente (R^2 próximo de 1), as redes neurais se mostraram eficazes na identificação das correlações entre variáveis, tornando-se uma ferramenta poderosa para a análise de grandes volumes de dados.Com base na rede neural desenvolvida em *PyTorch*, foi gerado um novo banco de dados com 1.235.494 amostras, a partir do qual foi ajustada uma equação para o cálculo da capacidade resistente.

A equação apresentou um bom ajuste, com $R^2 = 0,86$ e erro médio percentual (MAPE) de 6,78%, um valor satisfatório considerando-se o coeficiente de segurança adotado de 1,25. A eficiência da equação foi validada por sua aplicação no banco de dados original (840 amostras), onde obteve R^2 de 0,85 e MAPE de 8,61%.

Diante desses resultados, conclui-se que a equação é capaz de determinar a capacidade resistente com boa precisão. Conclui-se ainda que a metodologia desenvolvida, discretizar o conector com elemento de barra, proporcionou um ganho no custo computacional que possibilita um extenso estudo paramétrico, como o desenvolvido nesse trabalho.

7.3. SUGESTÕES DE TRABALHO FUTUROS

Em decorrência das conclusões deste trabalho, sugere-se como pesquisas futuras:

i. A execução de programa experimental com CT isósceles com altura de 70, 90 e 110mm para a calibração dos modelos numéricos e posteriormente reajustar expoentes e coeficiente da equação com esses novos dados;
ii. Desenvolvimento de modelos numéricos com resistência do aço entre 500 e 700 MPa a fim de ter uma amostragem para mais valores e avaliar o impacto disso na equação proposta;
iii. Avaliar a influência do cobrimento da laje, da disposição dos conectores e de concretos de alto desempenho na capacidade resistente;
iv. Realizar estudo de lajes mistas de aço e concreto com o CT isósceles avaliando a influência da posição perpendicular do conector em relação as nervuras;
v. Utilizar a equação proposta para o dimensionamento de vigas mistas com CT isósceles e ensaiá-las experimentalmente em tamanho real;

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTION OFFICIALS. (2004). AASHTO LRFS. **Bridge construction specifications**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, 237 p., 2024.

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.

BEZERRA, L. M.; CAVALCANTE, O. O.; CHATER, L.; BONILLA, J. V-shaped shear connector for composite steel-concrete beam. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 150 n. 12, p. 162-174, 2018-a.

BEZERRA, L. M.; BARBOSA, W. C. S.; BONILLA, J.; CAVALCANTE, O. R. O. Truss-type shear connector for composite steel-concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 757–767, 2018-b.

BISHOP, C, M. **Pattern Recognition and Machine Learning**. USA: Springer, 2006.

BONILLA, J.; BEZERRA, L. M.; LARRÚA, R.; RECAREY, 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 Ingenieria de Construccion**, v. 30, n. 1, p. 53–68, 2015.

BONILLA, J.; BEZERRA, L. M.; MIRAMBELL, E. Resistance of stud shear connectors in composite beams using profiled steel sheeting. **Engineering Structures**, v. 187, p. 478–489, 2019.

CÂNDIDO-MARTINS, J. P. S.; COSTA-NEVES, L. F.; VELLASCO, P. C. G. D. S. Experimental evaluation of the structural response of Perfobond shear connectors. **Engineering Structures**, v. 32, n. 8, p. 1976–1985, 2010.

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.

CHAI, W., DI, J., LU, Y., QIN, F., MEN, P., SU, Y. Experimental investigation on static mechanical performance of grouped-stud shear connectors in steel–UHPC composite beams. **Engineering Structures**. v.306, p. 117836, 2024.

CHIEN, E. Y. L.; RITCHIE, J. K. **Design and construction of composite floor systems.** Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, Ontario, 1984.

DING, F., YIN, G., WANG, H., WANG, L., GUO, Q. Static behavior of stud connectors in bi-direction push-off tests. Thin-Walled Structures. v. 120, p. 307-318, 2017.

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.

ELLOBODY, E.; YOUNG, B. Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, n. 7, p. 682–694, 2006-a.

ELLOBODY, E.; YOUNG, B.; LAM, D. Behaviour of normal and high strength concretefilled compact steel tube circular stub columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, 706_15. 2006-b

ELLOBODY, E.; YOUNG, B.. Nonlinear analysis of composite castellated beams with pro fi led steel sheeting exposed to different fi re conditions. **Journal of Constructional Steel Research**. 2015;113:247–60.

EUROPEAN COMMOTTEE FOR STANDARDIZATION. (2004). **Eurocode 4 - Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.**

EUROPEAN COMMOTTEE FOR STANDARDIZATION. (1992). **Eurocode-2: Design of concrete structures, Part1: General rules and rules for building. CEN; 1992.**

GU, D., JIANG, B., LIN, J., XU, L., PAN, J. **Shear behaviour of steel-headed stud connectors in engineered cementitious composite (ECC) bridge deck under positive and negative moments.** Engineering Structures, v. 324, (2025).

HAN, Q.; WANG, Y.; XU, J.; XING, Y.; YANG, G. Numerical analysis on shear stud in push-out test with crumb rubber concrete. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 130, p. 148–158, 2017.

GÉRON, A. **Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems.** 2ª ed. Canadá: O'Reilly, 2019.

HAJEK, P. Concrete Structures for Sustainability in a Changing World. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 207-214, 2017.

HE, J., WANG, Z., VASDRAVELLIS, G., WANG, L., XIN, H., CORREIA, J., BERTO, F. Fatigue tests and fatigue-life prediction models for hybrid welded-bolted demountable shear connectors. **International Journal of Fatigue**, v. 175, 2023

KIM, S. H.; KIM, K. S.; PARK, S.; AHN, J. H.; LEE, M. K. Y-type perfobond rib shear connectors subjected to fatigue loading on highway bridges. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 122, p. 445–454, 2016.

KIM, S.H., PARK, S., KIM K.S., JUNG C.Y. Generalized formulation for shear resistance on Y-type perfobond rib shear connectors. **Journal of Constructional Steel Research**. 2017;128:245–60.

KOTINDA, T. I. (2006). **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente Apoiadas: Ênfase ao estudo da interface laje-viga**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 116p.

KOŹUCH, M.; LORENC, W. The behaviour of clothoid-shaped composite dowels: Experimental and numerical investigations. **Journal of Constructional Steel Research**. 2020;167.

LACKI, P.; NAWROT, J.; DERLATKA, A.; WINOWIECKA, J. Numerical and experimental tests of steel-concrete composite beam with the connector made of top-hat profile. **Composite Structures**. 2019;211:244–53.

LAM, D.; EL-LOBODY, E. Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam. **Journal of Structural Engineering**, v. 131, n. 1, p. 96–107, 2005.

LEONHARDT, F.; ANDRÄ, W.; ANDRÄ, H.P.; HARRE, W. New Improved Shear Connector With High Fatigue Strength for Composite Structures. **Beton und Stahlbetonbau**, Berlim, n. 12, p. 325-331, 1987.

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 de Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88p.

LIMA, J. M.; BEZERRA, L. M.; BONILLA, J.; SILVA, R. S. Y. R. C.; BARBOSA, W. C. S. Behavior and resistance of truss-type shear connector for composite steel-concrete beams. **Steel and Composite Structures**, v. 36, n. 5, p. 569–586, 2020.

LIMA, J. M. **Estudo experimental e numérico do comportamento de vigas mistas aço-concreto com conector treliçado**. 2021. 194 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

LIMA, J. M.; BEZERRA, L. M.; BONILLA, J.; BARBOSA, W. C. S. 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., BEZERRA, L. M., BONILLA, J., MIRAMBELL, E. Experimental study on full scale steel-concrete composite beams using truss-type shear connectors. **Engineering Structures**, v. 303, p. 117490, 2024

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

MIRAMBELL, E.; BONILLA, J.; BEZERRA, L.M.; CLERO, B. Numerical study on the deflections of steel-concrete composite beams with partial interaction. **Steel Composite Structure**. 2021;38:67–78.

MOEIN, M. M., SARADAR, A., RAHMATI, K., MOUSAVINEJAD, S. H. G., BRISTOW, J., ARAMALI, V., KARAKOUZIAN, M. Predictive models for concrete properties using machine learning and deep learning approaches: A review. **Journal of Building Engineering**. v. 63, p. 105444, 2023.

MOURA, P. H. R.; SILVA, R. S. Y. R. C.; LIMA, J. M.; BEZERRA, L. M.; RODRIGUES, G. H. S.; BEZERRA, E. M. F. Investigation of the resistance capacity of the right-angle truss-type shear connector using finite element method. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 21, p. 569, 2024.

NGUYEN, H. T.; KIM, S. E. Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 65, n. 10–11, p. 1909–1920, 2009.

NUMANOVIĆ, M.; KNOBLOCH, M. Web shear buckling of steel-concrete composite girders – advanced numerical analysis. **Thin-Walled Structures**. v. 206, p.112671, 2025.

OLLER, S. (1988). **Un modelo de "daño continuo" para materiales-friccionales**. Trabajo para grado de Doctor, Escola Tècnica Superior D'Enginyers De Camins, Canals I Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, p. 471.

PFEIL, W. do C.; PFEIL, M. S. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.

QIU, S.Y.; GUO, Y.T.; NIE, X.; FAN, J.S.; TAO, M.X. Experimental study on shaped steel shear connectors used in large-scale composite structures. **Journal of Constructional Steel Research.** 2020;172: 106201.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; GALVÃO, A. **Estruturas mistas – Volume 1**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012.

QURESHI, J.; LAM, D.; YE, J. 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.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E.; MALHAS, F. A. **STEEL STRUCTURE: Desing and Behavior**. 5ª ed. USA: Pearson, 2009.

SHARIATI, M.; RAMLI, S. N. H.; SHARIATI, A.; KHANOUKI, M. A. Behavior of V-shaped angle shear connectors: experimental and parametric study. **Materials and Structures**, v. 49, n. 9, p. 3909–3926, 2016.

SILVA, V. P.; CARVALHO, R. d. A.; RÊGO, J. H. d. S.; EVANGELISTA, F. Jr. Machine Learning-Based Prediction of the Compressive Strength of Brazilian Concretes: A Dual-Dataset Study. **Materials** 2023, 16, 4977.

VELDANDA, M. R.; HOSAIN, M. U. **Behavior of Perfobond rib shear connectors: pushouttests**, Structural Engineering Research Report No. 37, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1991.

VERÍSSIMO, O. S. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento**. 316 f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

VIGNERI, V.; ODENBREIT, C.; BRAUN, M. Numerical evaluation of the plastic hinges developed in headed stud shear connectors in composite beams with profiled steel sheeting. **Structure**. v. 21, p.103-110, 2019.

XU, X.; LIU, Y.; HE, J. Study on mechanical behavior of rubber-sleeved studs for steel and concrete composite structures. **Construction and Building Materials**. 2014;53:533–46.

YAN, J.; ZHANG, W.; LIEW, J. Y. R.; LI, Z. Numerical studies on shear resistance of headed stud connectors in different concretes under Arctic low temperature. **Materials and Desing**. v. 112, p. 184-196, 2016.

APÊNDICE

A. CAPACIDADE RESISTENTE DOS MODELOS NUMÉRICOS

Na Figura A.1 estão representados os pontos nos quais foram extraídos a variáveis RF3 e U3. A RF3 no ponto de referência RP1 e U3 em um ponto localizado no perfil na região entre conectores e no mesmo alinhamento.

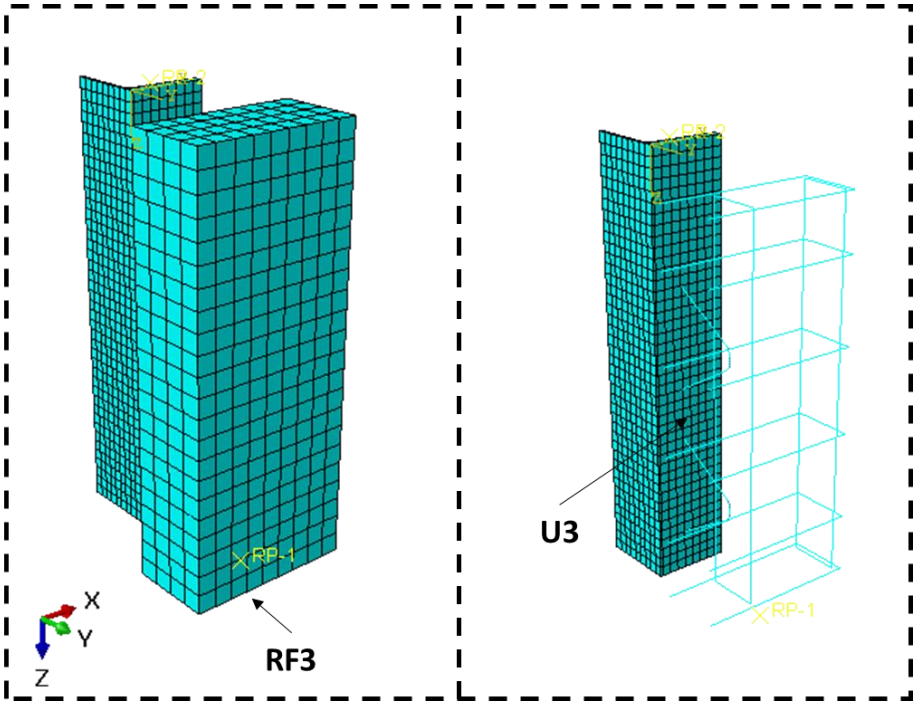


Figura A.1: Localização dos pontos de extração das variáveis RF3 e U3

Tabela A.1: Capacidade Resistente (CR) por CT

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H70-A40-D8-C20-CA50	53,437	H70-A40-D8-C40-CA50	71,958
H70-A40-D8-C20-CA70	60,148	H70-A40-D8-C40-CA70	77,394
H70-A40-D8-C25-CA50	58,567	H70-A40-D8-C45-CA50	75,907
H70-A40-D8-C25-CA70	65,234	H70-A40-D8-C45-CA70	81,786
H70-A40-D8-C30-CA50	62,718	H70-A40-D8-C50-CA50	79,733
H70-A40-D8-C30-CA70	69,350	H70-A40-D8-C50-CA70	86,274
H70-A40-D8-C35-CA50	67,081	H70-A40-D10-C20-CA50	65,133
H70-A40-D8-C35-CA70	74,571	H70-A40-D10-C20-CA70	65,336

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H70-A40-D10-C25-CA50	67,995	H70-A40-D12-C50-CA70	123,610
H70-A40-D10-C25-CA70	75,196	H70-A50-D8-C20-CA50	53,996
H70-A40-D10-C30-CA50	73,418	H70-A50-D8-C20-CA70	62,471
H70-A40-D10-C30-CA70	82,265	H70-A50-D8-C25-CA50	58,850
H70-A40-D10-C35-CA50	77,231	H70-A50-D8-C25-CA70	66,454
H70-A40-D10-C35-CA70	85,373	H70-A50-D8-C30-CA50	62,877
H70-A40-D10-C40-CA50	78,910	H70-A50-D8-C30-CA70	72,735
H70-A40-D10-C40-CA70	87,414	H70-A50-D8-C35-CA50	66,798
H70-A40-D10-C45-CA50	83,657	H70-A50-D8-C35-CA70	77,314
H70-A40-D10-C45-CA70	97,083	H70-A50-D8-C40-CA50	70,394
H70-A40-D10-C50-CA50	93,144	H70-A50-D8-C40-CA70	81,009
H70-A40-D10-C50-CA70	94,247	H70-A50-D8-C45-CA50	73,711
H70-A40-D12-C20-CA50	74,917	H70-A50-D8-C45-CA70	84,115
H70-A40-D12-C20-CA70	79,112	H70-A50-D8-C50-CA50	76,641
H70-A40-D12-C25-CA50	83,346	H70-A50-D8-C50-CA70	88,674
H70-A40-D12-C25-CA70	88,557	H70-A50-D10-C20-CA50	63,908
H70-A40-D12-C30-CA50	88,063	H70-A50-D10-C20-CA70	66,216
H70-A40-D12-C30-CA70	91,743	H70-A50-D10-C25-CA50	70,309
H70-A40-D12-C35-CA50	95,546	H70-A50-D10-C25-CA70	73,937
H70-A40-D12-C35-CA70	99,335	H70-A50-D10-C30-CA50	73,114
H70-A40-D12-C40-CA50	104,929	H70-A50-D10-C30-CA70	78,283
H70-A40-D12-C40-CA70	107,430	H70-A50-D10-C35-CA50	77,658
H70-A40-D12-C45-CA50	112,233	H70-A50-D10-C35-CA70	82,204
H70-A40-D12-C45-CA70	113,796	H70-A50-D10-C40-CA50	83,635
H70-A40-D12-C50-CA50	116,653	H70-A50-D10-C40-CA70	87,445

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H70-A50-D10-C45-CA50	87,126	H70-A60-D8-C35-CA70	77,487
H70-A50-D10-C45-CA70	92,072	H70-A60-D8-C40-CA50	70,378
H70-A50-D10-C50-CA50	91,352	H70-A60-D8-C40-CA70	81,498
H70-A50-D10-C50-CA70	97,455	H70-A60-D8-C45-CA50	73,486
H70-A50-D12-C20-CA50	77,033	H70-A60-D8-C45-CA70	84,243
H70-A50-D12-C20-CA70	81,639	H70-A60-D8-C50-CA50	76,364
H70-A50-D12-C25-CA50	82,821	H70-A60-D8-C50-CA70	88,289
H70-A50-D12-C25-CA70	87,823	H70-A60-D10-C20-CA50	62,546
H70-A50-D12-C30-CA50	90,687	H70-A60-D10-C20-CA70	66,742
H70-A50-D12-C30-CA70	94,284	H70-A60-D10-C25-CA50	71,177
H70-A50-D12-C35-CA50	98,462	H70-A60-D10-C25-CA70	73,796
H70-A50-D12-C35-CA70	103,459	H70-A60-D10-C30-CA50	72,711
H70-A50-D12-C40-CA50	104,978	H70-A60-D10-C30-CA70	80,889
H70-A50-D12-C40-CA70	107,502	H70-A60-D10-C35-CA50	77,414
H70-A50-D12-C45-CA50	111,954	H70-A60-D10-C35-CA70	90,330
H70-A50-D12-C45-CA70	114,232	H70-A60-D10-C40-CA50	81,937
H70-A50-D12-C50-CA50	120,147	H70-A60-D10-C40-CA70	94,318
H70-A50-D12-C50-CA70	120,683	H70-A60-D10-C45-CA50	84,884
H70-A60-D8-C20-CA50	55,474	H70-A60-D10-C45-CA70	97,638
H70-A60-D8-C20-CA70	61,929	H70-A60-D10-C50-CA50	89,469
H70-A60-D8-C25-CA50	59,711	H70-A60-D10-C50-CA70	106,687
H70-A60-D8-C25-CA70	68,283	H70-A60-D12-C20-CA50	75,474
H70-A60-D8-C30-CA50	63,246	H70-A60-D12-C20-CA70	79,154
H70-A60-D8-C30-CA70	73,344	H70-A60-D12-C25-CA50	83,225
H70-A60-D8-C35-CA50	67,007	H70-A60-D12-C25-CA70	84,760

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H70-A60-D12-C30-CA50	93,831	H70-A70-D10-C20-CA70	66,921
H70-A60-D12-C30-CA70	94,188	H70-A70-D10-C25-CA50	70,314
H70-A60-D12-C35-CA50	101,273	H70-A70-D10-C25-CA70	73,715
H70-A60-D12-C35-CA70	101,389	H70-A70-D10-C30-CA50	77,720
H70-A60-D12-C40-CA50	105,121	H70-A70-D10-C30-CA70	81,174
H70-A60-D12-C40-CA70	107,113	H70-A70-D10-C35-CA50	79,440
H70-A60-D12-C45-CA50	111,008	H70-A70-D10-C35-CA70	85,303
H70-A60-D12-C45-CA70	114,224	H70-A70-D10-C40-CA50	83,586
H70-A60-D12-C50-CA50	118,185	H70-A70-D10-C40-CA70	95,433
H70-A60-D12-C50-CA70	120,289	H70-A70-D10-C45-CA50	90,700
H70-A70-D8-C20-CA50	57,849	H70-A70-D10-C45-CA70	103,879
H70-A70-D8-C20-CA70	67,521	H70-A70-D10-C50-CA50	92,847
H70-A70-D8-C25-CA50	62,191	H70-A70-D10-C50-CA70	103,660
H70-A70-D8-C25-CA70	72,624	H70-A70-D12-C20-CA50	79,089
H70-A70-D8-C30-CA50	65,292	H70-A70-D12-C20-CA70	80,830
H70-A70-D8-C30-CA70	76,373	H70-A70-D12-C25-CA50	91,189
H70-A70-D8-C35-CA50	68,360	H70-A70-D12-C25-CA70	91,348
H70-A70-D8-C35-CA70	79,985	H70-A70-D12-C30-CA50	98,279
H70-A70-D8-C40-CA50	71,636	H70-A70-D12-C30-CA70	97,579
H70-A70-D8-C40-CA70	83,600	H70-A70-D12-C35-CA50	107,803
H70-A70-D8-C45-CA50	74,594	H70-A70-D12-C35-CA70	109,151
H70-A70-D8-C45-CA70	86,190	H70-A70-D12-C40-CA50	109,977
H70-A70-D8-C50-CA50	77,464	H70-A70-D12-C40-CA70	111,554
H70-A70-D8-C50-CA70	89,808	H70-A70-D12-C45-CA50	116,826
H70-A70-D10-C20-CA50	63,340	H70-A70-D12-C45-CA70	118,726

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H70-A70-D12-C50-CA50	125,909	H70-A80-D10-C40-CA70	94,464
H70-A70-D12-C50-CA70	134,093	H70-A80-D10-C45-CA50	92,798
H70-A80-D8-C20-CA50	63,075	H70-A80-D10-C45-CA70	100,355
H70-A80-D8-C20-CA70	71,685	H70-A80-D10-C50-CA50	97,450
H70-A80-D8-C25-CA50	66,280	H70-A80-D10-C50-CA70	103,978
H70-A80-D8-C25-CA70	77,128	H70-A80-D12-C20-CA50	82,128
H70-A80-D8-C30-CA50	69,519	H70-A80-D12-C20-CA70	84,161
H70-A80-D8-C30-CA70	81,226	H70-A80-D12-C25-CA50	91,658
H70-A80-D8-C35-CA50	72,620	H70-A80-D12-C25-CA70	94,116
H70-A80-D8-C35-CA70	84,244	H70-A80-D12-C30-CA50	103,499
H70-A80-D8-C40-CA50	75,018	H70-A80-D12-C30-CA70	103,765
H70-A80-D8-C40-CA70	88,044	H70-A80-D12-C35-CA50	108,588
H70-A80-D8-C45-CA50	77,847	H70-A80-D12-C35-CA70	110,639
H70-A80-D8-C45-CA70	90,317	H70-A80-D12-C40-CA50	116,473
H70-A80-D8-C50-CA50	79,737	H70-A80-D12-C40-CA70	118,313
H70-A80-D8-C50-CA70	93,023	H70-A80-D12-C45-CA50	123,804
H70-A80-D10-C20-CA50	66,227	H70-A80-D12-C45-CA70	127,738
H70-A80-D10-C20-CA70	71,415	H70-A80-D12-C50-CA50	132,654
H70-A80-D10-C25-CA50	71,456	H70-A80-D12-C50-CA70	134,399
H70-A80-D10-C25-CA70	80,072	H90-A40-D8-C20-CA50	58,986
H70-A80-D10-C30-CA50	78,431	H90-A40-D8-C20-CA70	68,484
H70-A80-D10-C30-CA70	83,871	H90-A40-D8-C25-CA50	66,973
H70-A80-D10-C35-CA50	81,584	H90-A40-D8-C25-CA70	74,918
H70-A80-D10-C35-CA70	87,491	H90-A40-D8-C30-CA50	69,133
H70-A80-D10-C40-CA50	87,670	H90-A40-D8-C30-CA70	80,112

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H90-A40-D8-C35-CA50	75,443	H90-A40-D12-C25-CA70	102,866
H90-A40-D8-C35-CA70	89,643	H90-A40-D12-C30-CA50	105,874
H90-A40-D8-C40-CA50	76,843	H90-A40-D12-C30-CA70	113,673
H90-A40-D8-C40-CA70	93,890	H90-A40-D12-C35-CA50	113,290
H90-A40-D8-C45-CA50	80,873	H90-A40-D12-C35-CA70	120,502
H90-A40-D8-C45-CA70	96,391	H90-A40-D12-C40-CA50	121,366
H90-A40-D8-C50-CA50	84,480	H90-A40-D12-C40-CA70	129,945
H90-A40-D8-C50-CA70	98,414	H90-A40-D12-C45-CA50	127,999
H90-A40-D10-C20-CA50	61,835	H90-A40-D12-C45-CA70	136,694
H90-A40-D10-C20-CA70	68,510	H90-A40-D12-C50-CA50	133,199
H90-A40-D10-C25-CA50	68,173	H90-A40-D12-C50-CA70	140,943
H90-A40-D10-C25-CA70	72,939	H90-A50-D8-C20-CA50	58,861
H90-A40-D10-C30-CA50	73,006	H90-A50-D8-C20-CA70	67,592
H90-A40-D10-C30-CA70	79,671	H90-A50-D8-C25-CA50	63,888
H90-A40-D10-C35-CA50	79,188	H90-A50-D8-C25-CA70	76,363
H90-A40-D10-C35-CA70	85,141	H90-A50-D8-C30-CA50	68,613
H90-A40-D10-C40-CA50	82,877	H90-A50-D8-C30-CA70	79,450
H90-A40-D10-C40-CA70	92,237	H90-A50-D8-C35-CA50	74,079
H90-A40-D10-C45-CA50	87,870	H90-A50-D8-C35-CA70	86,104
H90-A40-D10-C45-CA70	93,811	H90-A50-D8-C40-CA50	77,648
H90-A40-D10-C50-CA50	91,931	H90-A50-D8-C40-CA70	88,462
H90-A40-D10-C50-CA70	98,638	H90-A50-D8-C45-CA50	81,615
H90-A40-D12-C20-CA50	86,427	H90-A50-D8-C45-CA70	97,179
H90-A40-D12-C20-CA70	90,867	H90-A50-D8-C50-CA50	84,864
H90-A40-D12-C25-CA50	97,204	H90-A50-D8-C50-CA70	101,206

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H90-A50-D10-C20-CA50	63,415	H90-A50-D12-C45-CA70	141,789
H90-A50-D10-C20-CA70	66,991	H90-A50-D12-C50-CA50	138,822
H90-A50-D10-C25-CA50	68,675	H90-A50-D12-C50-CA70	148,020
H90-A50-D10-C25-CA70	74,773	H90-A60-D8-C20-CA50	59,875
H90-A50-D10-C30-CA50	72,269	H90-A60-D8-C20-CA70	69,284
H90-A50-D10-C30-CA70	83,015	H90-A60-D8-C25-CA50	64,709
H90-A50-D10-C35-CA50	78,341	H90-A60-D8-C25-CA70	74,759
H90-A50-D10-C35-CA70	87,012	H90-A60-D8-C30-CA50	68,850
H90-A50-D10-C40-CA50	84,955	H90-A60-D8-C30-CA70	78,932
H90-A50-D10-C40-CA70	90,856	H90-A60-D8-C35-CA50	72,481
H90-A50-D10-C45-CA50	88,703	H90-A60-D8-C35-CA70	83,451
H90-A50-D10-C45-CA70	95,321	H90-A60-D8-C40-CA50	75,985
H90-A50-D10-C50-CA50	93,580	H90-A60-D8-C40-CA70	87,078
H90-A50-D10-C50-CA70	100,756	H90-A60-D8-C45-CA50	79,077
H90-A50-D12-C20-CA50	90,633	H90-A60-D8-C45-CA70	90,834
H90-A50-D12-C20-CA70	95,543	H90-A60-D8-C50-CA50	82,045
H90-A50-D12-C25-CA50	100,899	H90-A60-D8-C50-CA70	94,143
H90-A50-D12-C25-CA70	109,079	H90-A60-D10-C20-CA50	67,582
H90-A50-D12-C30-CA50	109,187	H90-A60-D10-C20-CA70	72,100
H90-A50-D12-C30-CA70	119,008	H90-A60-D10-C25-CA50	73,443
H90-A50-D12-C35-CA50	118,996	H90-A60-D10-C25-CA70	82,018
H90-A50-D12-C35-CA70	128,618	H90-A60-D10-C30-CA50	78,551
H90-A50-D12-C40-CA50	123,835	H90-A60-D10-C30-CA70	86,336
H90-A50-D12-C40-CA70	135,085	H90-A60-D10-C35-CA50	84,142
H90-A50-D12-C45-CA50	132,771	H90-A60-D10-C35-CA70	90,370

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H90-A60-D10-C40-CA50	89,685	H90-A70-D8-C30-CA70	79,048
H90-A60-D10-C40-CA70	94,362	H90-A70-D8-C35-CA50	69,949
H90-A60-D10-C45-CA50	97,974	H90-A70-D8-C35-CA70	82,653
H90-A60-D10-C45-CA70	96,856	H90-A70-D8-C40-CA50	73,083
H90-A60-D10-C50-CA50	100,595	H90-A70-D8-C40-CA70	85,889
H90-A60-D10-C50-CA70	104,004	H90-A70-D8-C45-CA50	76,231
H90-A60-D12-C20-CA50	90,579	H90-A70-D8-C45-CA70	88,930
H90-A60-D12-C20-CA70	97,503	H90-A70-D8-C50-CA50	78,948
H90-A60-D12-C25-CA50	100,000	H90-A70-D8-C50-CA70	92,044
H90-A60-D12-C25-CA70	109,158	H90-A70-D10-C20-CA50	69,498
H90-A60-D12-C30-CA50	112,672	H90-A70-D10-C20-CA70	72,055
H90-A60-D12-C30-CA70	119,379	H90-A70-D10-C25-CA50	77,332
H90-A60-D12-C35-CA50	122,616	H90-A70-D10-C25-CA70	79,522
H90-A60-D12-C35-CA70	129,238	H90-A70-D10-C30-CA50	82,163
H90-A60-D12-C40-CA50	131,389	H90-A70-D10-C30-CA70	87,246
H90-A60-D12-C40-CA70	135,679	H90-A70-D10-C35-CA50	87,277
H90-A60-D12-C45-CA50	141,795	H90-A70-D10-C35-CA70	94,810
H90-A60-D12-C45-CA70	145,095	H90-A70-D10-C40-CA50	91,391
H90-A60-D12-C50-CA50	149,856	H90-A70-D10-C40-CA70	100,129
H90-A60-D12-C50-CA70	153,231	H90-A70-D10-C45-CA50	98,869
H90-A70-D8-C20-CA50	60,040	H90-A70-D10-C45-CA70	101,090
H90-A70-D8-C20-CA70	70,186	H90-A70-D10-C50-CA50	104,663
H90-A70-D8-C25-CA50	63,523	H90-A70-D10-C50-CA70	106,129
H90-A70-D8-C25-CA70	74,727	H90-A70-D12-C20-CA50	89,209
H90-A70-D8-C30-CA50	66,821	H90-A70-D12-C20-CA70	96,864

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H90-A70-D12-C25-CA50	100,821	H90-A80-D8-C50-CA70	95,707
H90-A70-D12-C25-CA70	106,373	H90-A80-D10-C20-CA50	70,647
H90-A70-D12-C30-CA50	111,160	H90-A80-D10-C20-CA70	73,120
H90-A70-D12-C30-CA70	115,837	H90-A80-D10-C25-CA50	79,338
H90-A70-D12-C35-CA50	120,252	H90-A80-D10-C25-CA70	82,860
H90-A70-D12-C35-CA70	124,747	H90-A80-D10-C30-CA50	85,126
H90-A70-D12-C40-CA50	131,425	H90-A80-D10-C30-CA70	90,691
H90-A70-D12-C40-CA70	134,689	H90-A80-D10-C35-CA50	92,509
H90-A70-D12-C45-CA50	139,346	H90-A80-D10-C35-CA70	95,897
H90-A70-D12-C45-CA70	144,367	H90-A80-D10-C40-CA50	99,240
H90-A70-D12-C50-CA50	147,273	H90-A80-D10-C40-CA70	103,136
H90-A70-D12-C50-CA70	153,035	H90-A80-D10-C45-CA50	103,296
H90-A80-D8-C20-CA50	65,375	H90-A80-D10-C45-CA70	107,639
H90-A80-D8-C20-CA70	76,066	H90-A80-D10-C50-CA50	106,862
H90-A80-D8-C25-CA50	69,056	H90-A80-D10-C50-CA70	114,211
H90-A80-D8-C25-CA70	80,996	H90-A80-D12-C20-CA50	96,737
H90-A80-D8-C30-CA50	72,262	H90-A80-D12-C20-CA70	103,075
H90-A80-D8-C30-CA70	84,778	H90-A80-D12-C25-CA50	105,668
H90-A80-D8-C35-CA50	74,967	H90-A80-D12-C25-CA70	113,977
H90-A80-D8-C35-CA70	87,611	H90-A80-D12-C30-CA50	115,455
H90-A80-D8-C40-CA50	77,934	H90-A80-D12-C30-CA70	124,302
H90-A80-D8-C40-CA70	90,686	H90-A80-D12-C35-CA50	126,230
H90-A80-D8-C45-CA50	80,789	H90-A80-D12-C35-CA70	134,568
H90-A80-D8-C45-CA70	93,190	H90-A80-D12-C40-CA50	134,101
H90-A80-D8-C50-CA50	83,514	H90-A80-D12-C40-CA70	144,510

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H90-A80-D12-C45-CA50	140,279	H110-A40-D10-C35-CA70	85,335
H90-A80-D12-C45-CA70	152,192	H110-A40-D10-C40-CA50	83,572
H90-A80-D12-C50-CA50	154,686	H110-A40-D10-C40-CA70	89,607
H90-A80-D12-C50-CA70	161,670	H110-A40-D10-C45-CA50	95,281
H110-A40-D8-C20-CA50	64,616	H110-A40-D10-C45-CA70	93,751
H110-A40-D8-C20-CA70	69,790	H110-A40-D10-C50-CA50	100,454
H110-A40-D8-C25-CA50	70,046	H110-A40-D10-C50-CA70	96,514
H110-A40-D8-C25-CA70	83,006	H110-A40-D12-C20-CA50	96,239
H110-A40-D8-C30-CA50	77,158	H110-A40-D12-C20-CA70	101,395
H110-A40-D8-C30-CA70	89,854	H110-A40-D12-C25-CA50	110,507
H110-A40-D8-C35-CA50	77,267	H110-A40-D12-C25-CA70	112,992
H110-A40-D8-C35-CA70	94,799	H110-A40-D12-C30-CA50	122,488
H110-A40-D8-C40-CA50	84,165	H110-A40-D12-C30-CA70	126,635
H110-A40-D8-C40-CA70	95,448	H110-A40-D12-C35-CA50	133,983
H110-A40-D8-C45-CA50	84,586	H110-A40-D12-C35-CA70	138,474
H110-A40-D8-C45-CA70	102,738	H110-A40-D12-C40-CA50	145,222
H110-A40-D8-C50-CA50	87,790	H110-A40-D12-C40-CA70	152,425
H110-A40-D8-C50-CA70	108,426	H110-A40-D12-C45-CA50	153,906
H110-A40-D10-C20-CA50	61,914	H110-A40-D12-C45-CA70	163,779
H110-A40-D10-C20-CA70	64,263	H110-A40-D12-C50-CA50	162,582
H110-A40-D10-C25-CA50	69,982	H110-A40-D12-C50-CA70	175,004
H110-A40-D10-C25-CA70	70,206	H110-A50-D8-C20-CA50	63,017
H110-A40-D10-C30-CA50	75,311	H110-A50-D8-C20-CA70	76,188
H110-A40-D10-C30-CA70	78,720	H110-A50-D8-C25-CA50	68,586
H110-A40-D10-C35-CA50	82,481	H110-A50-D8-C25-CA70	82,446

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H110-A50-D8-C30-CA50	73,073	H110-A50-D12-C20-CA70	108,659
H110-A50-D8-C30-CA70	84,635	H110-A50-D12-C25-CA50	108,852
H110-A50-D8-C35-CA50	76,967	H110-A50-D12-C25-CA70	115,891
H110-A50-D8-C35-CA70	88,291	H110-A50-D12-C30-CA50	121,384
H110-A50-D8-C40-CA50	80,689	H110-A50-D12-C30-CA70	126,540
H110-A50-D8-C40-CA70	92,399	H110-A50-D12-C35-CA50	132,384
H110-A50-D8-C45-CA50	84,587	H110-A50-D12-C35-CA70	137,152
H110-A50-D8-C45-CA70	95,914	H110-A50-D12-C40-CA50	143,267
H110-A50-D8-C50-CA50	87,755	H110-A50-D12-C40-CA70	149,002
H110-A50-D8-C50-CA70	100,225	H110-A50-D12-C45-CA50	151,263
H110-A50-D10-C20-CA50	69,675	H110-A50-D12-C45-CA70	160,677
H110-A50-D10-C20-CA70	70,604	H110-A50-D12-C50-CA50	161,937
H110-A50-D10-C25-CA50	81,999	H110-A50-D12-C50-CA70	173,037
H110-A50-D10-C25-CA70	81,698	H110-A60-D8-C20-CA50	59,446
H110-A50-D10-C30-CA50	84,475	H110-A60-D8-C20-CA70	72,485
H110-A50-D10-C30-CA70	93,065	H110-A60-D8-C25-CA50	63,492
H110-A50-D10-C35-CA50	87,374	H110-A60-D8-C25-CA70	74,177
H110-A50-D10-C35-CA70	99,742	H110-A60-D8-C30-CA50	67,531
H110-A50-D10-C40-CA50	94,751	H110-A60-D8-C30-CA70	80,297
H110-A50-D10-C40-CA70	103,490	H110-A60-D8-C35-CA50	71,263
H110-A50-D10-C45-CA50	100,250	H110-A60-D8-C35-CA70	83,111
H110-A50-D10-C45-CA70	106,736	H110-A60-D8-C40-CA50	74,132
H110-A50-D10-C50-CA50	104,317	H110-A60-D8-C40-CA70	86,256
H110-A50-D10-C50-CA70	110,528	H110-A60-D8-C45-CA50	77,342
H110-A50-D12-C20-CA50	97,372	H110-A60-D8-C45-CA70	89,210

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H110-A60-D8-C50-CA50	80,311	H110-A60-D12-C40-CA70	153,399
H110-A60-D8-C50-CA70	92,485	H110-A60-D12-C45-CA50	154,551
H110-A60-D10-C20-CA50	69,345	H110-A60-D12-C45-CA70	166,265
H110-A60-D10-C20-CA70	71,653	H110-A60-D12-C50-CA50	162,261
H110-A60-D10-C25-CA50	78,783	H110-A60-D12-C50-CA70	176,060
H110-A60-D10-C25-CA70	79,124	H110-A70-D8-C20-CA50	58,226
H110-A60-D10-C30-CA50	83,538	H110-A70-D8-C20-CA70	69,873
H110-A60-D10-C30-CA70	87,438	H110-A70-D8-C25-CA50	62,134
H110-A60-D10-C35-CA50	90,200	H110-A70-D8-C25-CA70	73,604
H110-A60-D10-C35-CA70	94,961	H110-A70-D8-C30-CA50	65,723
H110-A60-D10-C40-CA50	95,247	H110-A70-D8-C30-CA70	77,519
H110-A60-D10-C40-CA70	101,575	H110-A70-D8-C35-CA50	68,713
H110-A60-D10-C45-CA50	110,995	H110-A70-D8-C35-CA70	80,034
H110-A60-D10-C45-CA70	110,509	H110-A70-D8-C40-CA50	71,762
H110-A60-D10-C50-CA50	115,021	H110-A70-D8-C40-CA70	83,239
H110-A60-D10-C50-CA70	115,152	H110-A70-D8-C45-CA50	74,976
H110-A60-D12-C20-CA50	106,154	H110-A70-D8-C45-CA70	86,955
H110-A60-D12-C20-CA70	110,483	H110-A70-D8-C50-CA50	77,134
H110-A60-D12-C25-CA50	112,005	H110-A70-D8-C50-CA70	89,633
H110-A60-D12-C25-CA70	123,483	H110-A70-D10-C20-CA50	73,152
H110-A60-D12-C30-CA50	122,963	H110-A70-D10-C20-CA70	75,621
H110-A60-D12-C30-CA70	131,334	H110-A70-D10-C25-CA50	78,790
H110-A60-D12-C35-CA50	138,351	H110-A70-D10-C25-CA70	84,483
H110-A60-D12-C35-CA70	144,688	H110-A70-D10-C30-CA50	84,909
H110-A60-D12-C40-CA50	144,690	H110-A70-D10-C30-CA70	91,592

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H110-A70-D10-C35-CA50	91,860	H110-A80-D8-C25-CA70	79,684
H110-A70-D10-C35-CA70	99,136	H110-A80-D8-C30-CA50	70,517
H110-A70-D10-C40-CA50	97,247	H110-A80-D8-C30-CA70	83,169
H110-A70-D10-C40-CA70	103,956	H110-A80-D8-C35-CA50	73,429
H110-A70-D10-C45-CA50	100,129	H110-A80-D8-C35-CA70	85,918
H110-A70-D10-C45-CA70	106,706	H110-A80-D8-C40-CA50	76,030
H110-A70-D10-C50-CA50	103,955	H110-A80-D8-C40-CA70	88,229
H110-A70-D10-C50-CA70	121,767	H110-A80-D8-C45-CA50	78,347
H110-A70-D12-C20-CA50	109,827	H110-A80-D8-C45-CA70	90,905
H110-A70-D12-C20-CA70	120,783	H110-A80-D8-C50-CA50	80,626
H110-A70-D12-C25-CA50	119,126	H110-A80-D8-C50-CA70	92,936
H110-A70-D12-C25-CA70	133,143	H110-A80-D10-C20-CA50	80,283
H110-A70-D12-C30-CA50	126,702	H110-A80-D10-C20-CA70	85,117
H110-A70-D12-C30-CA70	141,526	H110-A80-D10-C25-CA50	88,321
H110-A70-D12-C35-CA50	137,989	H110-A80-D10-C25-CA70	95,282
H110-A70-D12-C35-CA70	150,103	H110-A80-D10-C30-CA50	93,006
H110-A70-D12-C40-CA50	147,766	H110-A80-D10-C30-CA70	103,415
H110-A70-D12-C40-CA70	160,216	H110-A80-D10-C35-CA50	96,924
H110-A70-D12-C45-CA50	153,854	H110-A80-D10-C35-CA70	107,835
H110-A70-D12-C45-CA70	172,227	H110-A80-D10-C40-CA50	102,340
H110-A70-D12-C50-CA50	161,088	H110-A80-D10-C40-CA70	117,090
H110-A70-D12-C50-CA70	179,882	H110-A80-D10-C45-CA50	105,305
H110-A80-D8-C20-CA50	62,945	H110-A80-D10-C45-CA70	121,232
H110-A80-D8-C20-CA70	75,164	H110-A80-D10-C50-CA50	110,368
H110-A80-D8-C25-CA50	66,876	H110-A80-D10-C50-CA70	127,098

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H110-A80-D12-C20-CA50	116,752	H130-A40-D8-C45-CA70	89,602
H110-A80-D12-C20-CA70	126,402	H130-A40-D8-C50-CA50	91,432
H110-A80-D12-C25-CA50	131,233	H130-A40-D8-C50-CA70	105,300
H110-A80-D12-C25-CA70	139,242	H130-A40-D10-C20-CA50	74,063
H110-A80-D12-C30-CA50	141,536	H130-A40-D10-C20-CA70	76,193
H110-A80-D12-C30-CA70	155,676	H130-A40-D10-C25-CA50	85,426
H110-A80-D12-C35-CA50	152,993	H130-A40-D10-C25-CA70	88,931
H110-A80-D12-C35-CA70	169,052	H130-A40-D10-C30-CA50	87,544
H110-A80-D12-C40-CA50	159,640	H130-A40-D10-C30-CA70	100,253
H110-A80-D12-C40-CA70	182,034	H130-A40-D10-C35-CA50	90,570
H110-A80-D12-C45-CA50	166,406	H130-A40-D10-C35-CA70	105,689
H110-A80-D12-C45-CA70	191,904	H130-A40-D10-C40-CA50	97,818
H110-A80-D12-C50-CA50	171,543	H130-A40-D10-C40-CA70	107,206
H110-A80-D12-C50-CA70	200,647	H130-A40-D10-C45-CA50	102,597
H130-A40-D8-C20-CA50	70,572	H130-A40-D10-C45-CA70	115,224
H130-A40-D8-C20-CA70	75,879	H130-A40-D10-C50-CA50	106,823
H130-A40-D8-C25-CA50	72,586	H130-A40-D10-C50-CA70	120,197
H130-A40-D8-C25-CA70	83,570	H130-A40-D12-C20-CA50	103,114
H130-A40-D8-C30-CA50	81,212	H130-A40-D12-C20-CA70	111,279
H130-A40-D8-C30-CA70	95,024	H130-A40-D12-C25-CA50	115,456
H130-A40-D8-C35-CA50	80,820	H130-A40-D12-C25-CA70	120,620
H130-A40-D8-C35-CA70	100,916	H130-A40-D12-C30-CA50	128,433
H130-A40-D8-C40-CA50	84,689	H130-A40-D12-C30-CA70	135,802
H130-A40-D8-C40-CA70	97,528	H130-A40-D12-C35-CA50	138,918
H130-A40-D8-C45-CA50	87,856	H130-A40-D12-C35-CA70	149,862

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H130-A40-D12-C40-CA50	151,833	H130-A50-D10-C30-CA70	92,252
H130-A40-D12-C40-CA70	160,632	H130-A50-D10-C35-CA50	93,819
H130-A40-D12-C45-CA50	163,029	H130-A50-D10-C35-CA70	99,069
H130-A40-D12-C45-CA70	170,997	H130-A50-D10-C40-CA50	99,340
H130-A40-D12-C50-CA50	170,560	H130-A50-D10-C40-CA70	104,749
H130-A40-D12-C50-CA70	184,690	H130-A50-D10-C45-CA50	101,774
H130-A50-D8-C20-CA50	65,746	H130-A50-D10-C45-CA70	109,804
H130-A50-D8-C20-CA70	74,969	H130-A50-D10-C50-CA50	104,885
H130-A50-D8-C25-CA50	71,078	H130-A50-D10-C50-CA70	114,887
H130-A50-D8-C25-CA70	81,917	H130-A50-D12-C20-CA50	112,243
H130-A50-D8-C30-CA50	75,307	H130-A50-D12-C20-CA70	118,874
H130-A50-D8-C30-CA70	93,156	H130-A50-D12-C25-CA50	122,414
H130-A50-D8-C35-CA50	79,544	H130-A50-D12-C25-CA70	131,053
H130-A50-D8-C35-CA70	91,947	H130-A50-D12-C30-CA50	134,610
H130-A50-D8-C40-CA50	82,786	H130-A50-D12-C30-CA70	147,195
H130-A50-D8-C40-CA70	96,285	H130-A50-D12-C35-CA50	143,335
H130-A50-D8-C45-CA50	86,012	H130-A50-D12-C35-CA70	159,281
H130-A50-D8-C45-CA70	99,479	H130-A50-D12-C40-CA50	154,890
H130-A50-D8-C50-CA50	89,348	H130-A50-D12-C40-CA70	171,549
H130-A50-D8-C50-CA70	103,037	H130-A50-D12-C45-CA50	162,445
H130-A50-D10-C20-CA50	69,445	H130-A50-D12-C45-CA70	182,621
H130-A50-D10-C20-CA70	76,697	H130-A50-D12-C50-CA50	174,597
H130-A50-D10-C25-CA50	77,142	H130-A50-D12-C50-CA70	192,552
H130-A50-D10-C25-CA70	83,934	H130-A60-D8-C20-CA50	57,974
H130-A50-D10-C30-CA50	85,112	H130-A60-D8-C20-CA70	68,586

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H130-A60-D8-C25-CA50	62,183	H130-A60-D10-C50-CA70	125,774
H130-A60-D8-C25-CA70	73,905	H130-A60-D12-C20-CA50	109,714
H130-A60-D8-C30-CA50	66,047	H130-A60-D12-C20-CA70	123,008
H130-A60-D8-C30-CA70	77,897	H130-A60-D12-C25-CA50	124,002
H130-A60-D8-C35-CA50	69,500	H130-A60-D12-C25-CA70	133,242
H130-A60-D8-C35-CA70	81,302	H130-A60-D12-C30-CA50	136,812
H130-A60-D8-C40-CA50	73,326	H130-A60-D12-C30-CA70	145,372
H130-A60-D8-C40-CA70	84,516	H130-A60-D12-C35-CA50	148,012
H130-A60-D8-C45-CA50	76,379	H130-A60-D12-C35-CA70	159,333
H130-A60-D8-C45-CA70	88,011	H130-A60-D12-C40-CA50	155,175
H130-A60-D8-C50-CA50	79,065	H130-A60-D12-C40-CA70	173,372
H130-A60-D8-C50-CA70	91,444	H130-A60-D12-C45-CA50	163,233
H130-A60-D10-C20-CA50	73,406	H130-A60-D12-C45-CA70	184,125
H130-A60-D10-C20-CA70	78,047	H130-A60-D12-C50-CA50	167,663
H130-A60-D10-C25-CA50	80,920	H130-A60-D12-C50-CA70	188,847
H130-A60-D10-C25-CA70	88,520	H130-A70-D8-C20-CA50	57,794
H130-A60-D10-C30-CA50	86,772	H130-A70-D8-C20-CA70	69,609
H130-A60-D10-C30-CA70	98,031	H130-A70-D8-C25-CA50	61,823
H130-A60-D10-C35-CA50	92,115	H130-A70-D8-C25-CA70	72,794
H130-A60-D10-C35-CA70	103,202	H130-A70-D8-C30-CA50	64,073
H130-A60-D10-C40-CA50	101,869	H130-A70-D8-C30-CA70	76,447
H130-A60-D10-C40-CA70	108,504	H130-A70-D8-C35-CA50	66,424
H130-A60-D10-C45-CA50	105,666	H130-A70-D8-C35-CA70	78,480
H130-A60-D10-C45-CA70	119,451	H130-A70-D8-C40-CA50	69,289
H130-A60-D10-C50-CA50	109,200	H130-A70-D8-C40-CA70	81,087

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)	NOMECLATURA	CR (kN)
H130-A70-D8-C45-CA50	71,888	H130-A70-D12-C35-CA70	173,854
H130-A70-D8-C45-CA70	84,137	H130-A70-D12-C40-CA50	164,578
H130-A70-D8-C50-CA50	73,962	H130-A70-D12-C40-CA70	184,691
H130-A70-D8-C50-CA70	86,861	H130-A70-D12-C45-CA50	173,256
H130-A70-D10-C20-CA50	79,686	H130-A70-D12-C45-CA70	195,901
H130-A70-D10-C20-CA70	89,817	H130-A70-D12-C50-CA50	179,839
H130-A70-D10-C25-CA50	87,151	H130-A70-D12-C50-CA70	204,435
H130-A70-D10-C25-CA70	97,553	H130-A80-D8-C20-CA50	62,895
H130-A70-D10-C30-CA50	92,707	H130-A80-D8-C20-CA70	75,013
H130-A70-D10-C30-CA70	103,096	H130-A80-D8-C25-CA50	65,735
H130-A70-D10-C35-CA50	98,661	H130-A80-D8-C25-CA70	78,948
H130-A70-D10-C35-CA70	108,311	H130-A80-D8-C30-CA50	68,152
H130-A70-D10-C40-CA50	102,464	H130-A80-D8-C30-CA70	81,554
H130-A70-D10-C40-CA70	113,893	H130-A80-D8-C35-CA50	70,887
H130-A70-D10-C45-CA50	115,746	H130-A80-D8-C35-CA70	83,253
H130-A70-D10-C45-CA70	117,934	H130-A80-D8-C40-CA50	72,972
H130-A70-D10-C50-CA50	111,261	H130-A80-D8-C40-CA70	72,972
H130-A70-D10-C50-CA70	123,208	H130-A80-D8-C45-CA50	75,499
H130-A70-D12-C20-CA50	124,045	H130-A80-D8-C45-CA70	88,017
H130-A70-D12-C20-CA70	130,628	H130-A80-D8-C50-CA50	78,047
H130-A70-D12-C25-CA50	133,588	H130-A80-D8-C50-CA70	108,44
H130-A70-D12-C25-CA70	150,502	H130-A80-D10-C20-CA50	86,791
H130-A70-D12-C30-CA50	143,603	H130-A80-D10-C20-CA70	93,893
H130-A70-D12-C30-CA70	161,361	H130-A80-D10-C25-CA50	92,045
H130-A70-D12-C35-CA50	154,738	H130-A80-D10-C25-CA70	108,231

Continuação

NOMECLATURA	CR (kN)
H130-A80-D10-C30-CA50	97,103
H130-A80-D10-C30-CA70	114,381
H130-A80-D10-C35-CA50	101,019
H130-A80-D10-C35-CA70	119,008
H130-A80-D10-C40-CA50	104,269
H130-A80-D10-C40-CA70	123,143
H130-A80-D10-C45-CA50	109,336
H130-A80-D10-C45-CA70	130,060
H130-A80-D10-C50-CA50	111,461
H130-A80-D10-C50-CA70	132,005
H130-A80-D12-C20-CA50	129,572
H130-A80-D12-C20-CA70	142,954
H130-A80-D12-C25-CA50	141,247
H130-A80-D12-C25-CA70	162,250
H130-A80-D12-C30-CA50	152,415
H130-A80-D12-C30-CA70	174,771
H130-A80-D12-C35-CA50	161,169
H130-A80-D12-C35-CA70	183,306
H130-A80-D12-C40-CA50	167,478
H130-A80-D12-C40-CA70	192,683
H130-A80-D12-C45-CA50	174,837
H130-A80-D12-C45-CA70	200,636
H130-A80-D12-C50-CA50	183,126
H130-A80-D12-C50-CA70	208,733

Fim