

UNIVERSIDADE COMUNITÁRIA DA REGIÃO DE CHAPECÓ
(UNOCHAPECO)
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão da Inovação

Diogo Bevilaqua

PROPOSIÇÃO DE UMA NOVA GEOMETRIA PARA CONECTOR DE
CISALHAMENTO EM VIGAS MISTAS DE AÇO-CONCRETO: UM ESTUDO DE
CASO

Chapecó - SC, 2018

DIOGO BEVILAQUA

PROPOSIÇÃO DE UMA NOVA GEOMETRIA PARA CONECTOR DE
CISALHAMENTO EM VIGAS MISTAS DE AÇO-CONCRETO: UM ESTUDO DE
CASO

Dissertação apresentada à Unochapecó como
parte dos requisitos para obtenção do grau de
mestre em Tecnologia e Gestão da Inovação.
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Roberto Batiston
Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Carlos Pavan

Chapecó - SC, set. 2018



UNIVERSIDADE COMUNITÁRIA DA REGIÃO DE CHAPECÓ

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia e
Gestão da Inovação

PROPOSIÇÃO DE UMA NOVA GEOMETRIA PARA CONECTOR DE
CISALHAMENTO EM VIGAS MISTAS DE AÇO-CONCRETO: UM
ESTUDO DE CASO

Diogo Bevilaqua

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do grau de
Mestre em Tecnologia e Gestão da Inovação
sendo aprovada em sua forma final.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Eduardo Roberto Batiston, Dr. em Engenharia Civil
Orientador

Prof. Roberto Carlos Pavan, Dr. em Engenharia Civil
Coorientador

Prof. Cristina Guimarães Cesar, Dra. em Engenharia Civil

Prof. Silvio Edmundo Pilz, Me. em Engenharia Civil

B571p Bevilaqua, Diogo
Proposição de uma nova geometria para conector de cisalhamento em vigas mistas de aço-concreto: um estudo de caso./Diogo Bevilaqua. - 2018.
107 f.: il.;

Orientador: Profº Dr. Eduardo Roberto Batiston
Coorientador: Profº Dr. Roberto Carlos Pavan
Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão da Inovação) -
Universidade Comunitária da Região de Chapecó, 2018.
Inclui Bibliografias

1. Vigas. 2. Aço-concreto. I. Batiston, Eduardo Roberto. II. Pavan, Roberto Carlos. III. Título.

CDD: Ed. 23 – 691.3

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a mim e a minha vontade de crescer e aprender como pessoa e profissional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me permitir chegar aonde cheguei.

Agradeço meus pais, porque mesmo distantes me proporcionaram a oportunidade de estudar e continuar acreditando no sonho de ser doutor, e também aos meus irmãos (Diego, Dieli e Saiury), por estarem ao meu lado durante esses anos todos.

Aos professores que tive durante toda a minha jornada acadêmica. À vocês eu agradeço por despertarem o ímpeto sentimento de querer ajudar e repassar o conhecimento adquirido.

Falando em professores, preciso também agradecer aos meus dois orientadores do mestrado, por todo o suporte repassado, aos dias dedicados no laboratório pesquisando e montando os aparatos de estudo, e às orientações (sei que não sou uma pessoa fácil de lidar e convencer, mas era o esperado, vindo de um libriano com ascendente em virgem). Com toda certeza nada disso teria acontecido sem vocês.

A todos os meus amigos que fizeram parte dessa jornada: os da faculdade (Estefani, Flavia, Jessica e Karina), os da pós-graduação (Cris, Natane e Rubia) e aos que me acompanharam durante esses anos de mestrado (Matheus, Letícia, Luana e Ivan), vocês todos foram fundamentais para que eu chegasse até aqui e tem um lugar especial no meu coração.

Falando em pessoa especial, quero agradecer com todo o meu coração essa pessoa maravilhosa chamada Júlio Henrique, que sempre esteve ao meu lado nos momentos de desespero (e foram muitos), que me apoiou, me deu suporte, e que independentemente da situação, sempre disse que tudo daria certo e ficaria bem. Enfim, agradeço imensamente pela ajuda prestada durante a construção desse projeto, você é uma pessoa mais que especial para mim.

As duas pessoas que me ajudaram na construção dos aparatos de ensaio: Seu Soimir José de Almeida e Carlito de Moraes. Obrigado por todo conhecimento repassado, e obrigado também pela paciência em explicar para mim cada um dos detalhes.

Ao QUERO ESTUDAR, o setor mais lindo da Unochapecó. Vocês foram muito importantes para mim e vou levar cada um de vocês no meu coração.

Por fim quero agradecer a Unochapecó pela bolsa de estudo e pelas oportunidades e também a UNIEDU pela contribuição financeira através das bolsas de estudo, sem as quais nada disso seria possível.

ΕΠΙΓΡΑΦΕ

It is our choices, that show
what we truly are,
far more than our abilities.

Albus Dumbledore (J. K. Rowling)

RESUMO

BEVILAQUA, D. **Proposição de uma nova geometria para conector de cisalhamento em vigas mistas de aço-concreto**: um estudo de caso. 2018. 104f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão da Inovação) - Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, 2018.

A utilização de vigas mistas de aço-concreto cria soluções estruturais mais eficientes quando comparada à utilização destes materiais isoladamente, tendo em vista que tais materiais são colocados em locais onde suas características são melhores aproveitadas, ou seja, o aço é posicionado no local tracionado e o concreto no local comprimido do elemento estrutural. Para que os dois materiais trabalhem em conjunto, e não isoladamente, utilizam-se conectores de cisalhamento que possuem duas funções principais: transferir os fluxos cisalhantes da laje de concreto para a viga metálica e também impedir a separação vertical (*uplift*) dos materiais. Sendo assim, esta pesquisa teve como principal objetivo propor uma nova geometria para ser utilizada como conector de cisalhamento em vigas mistas de aço-concreto, de fácil produção e baixo custo de fabricação. Para isso foi projetada e executada uma viga mista e modelo *push out* para avaliar a eficácia do elemento quando submetido a ensaio de flexão e cisalhamento direto. Foi realizado ainda levantamento orçamentário (viabilidade econômica) do conector, por meio da comparação com o modelo normatizado (*stud bolt*). Por fim, o estudo buscou apresentar de forma objetiva o método de como a construção e instrumentação dos aparatos foi realizada para que os interessados possam utilizar esta pesquisa como base para projetos futuros. Com os ensaios realizados verificou-se que a instrumentação proposta neste estudo mostrou-se eficiente, uma vez que foi possível coletar os dados que o estudo se dispôs a levantar. Mediante os resultados do ensaio de cisalhamento direto, pôde-se classificar o conector quanto à sua ductilidade, sendo considerado rígido, uma vez que o mesmo não continuou a se deformar após atingir a resistência máxima e entrar no estado limite último. Outro ponto importante constatado sobre o conector de cisalhamento diz respeito ao comportamento estrutural. Quando o concreto da viga mista e do modelo de *push out* foi rompido, constatou-se que os mesmos ainda estavam intactos e sem grandes deformações, podendo-se afirmar que é possível a redução da espessura de 2mm da chapa de aço-carbono utilizada. Com o ensaio de flexão realizado constatou-se que o conector cumpriu as duas principais funções para o qual foi projetado, e ainda que a viga foi submetida à interação total, tendo em vista que não houve deslocamento vertical diferencial entre a laje de concreto e a viga metálica. Em relação ao valor médio de produção do conector proposto, os mesmos se mostraram satisfatórios, levando-se em consideração a facilidade e baixa complexidade de produção e fixação destes sobre a mesa da viga metálica, apresentando economias de 45,35% se comparado ao conector padrão *stud bolt* (19x80mm). Apontando os aspectos mencionados conclui-se que o elemento proposto neste estudo atende as exigências mínimas para ser utilizado, considerando a facilidade de produção, o menor custo quando comparado ao conector *stud bolt* normatizado, além da real eficiência em manter o sistema misto com interação completa (eliminando o efeito de deslocamento relativo). Também mostrou eficiência em transferir os fluxos cisalhantes gerados, permitindo que os dois materiais se deformem em conjunto como um único elemento.

Palavras-chave: Interação aço-concreto. *Push out*. Vigas Mistas. Conector de cisalhamento.

ABSTRACT

The use of composite-steel beams creates more efficient structural solutions when compared to the use of these materials by itself, since these materials are utilized where their characteristics are better used, i.e., the steel is positioned in the traction site and the concrete in the compressed site of the structural element. For the two materials to work together and not in isolation, shear connectors are used, which have two main functions: to transfer the shear flows from the concrete slab to the metal beam and to prevent uplift of the materials. Therefore, this research had as main objective to propose a new geometry to be used as a shear connector in composite concrete beams, easy to produce and low manufacturing cost. For this, a mixed beam and a push out model were designed and executed to evaluate the effectiveness of the element when submitted to a direct shear and flexural test. It was also carried out a budget survey (economic viability) of the connector, through comparison with the standardized model (stud bolt). Finally, the study sought to objectively present the method of how the construction and instrumentation of the apparatus was performed so that the interested parts can use this research as a basis for future projects. Through the performed tests it was verified that the instrumentation proposed in this study was efficient, since it was possible to collect the data that the study was willing to acquire. Through the results of the direct shear test, it was possible to classify the connector ductility, being considered rigid since it did not continue to deform after reaching its maximum resistance and entering the final limit state. Another important point verified about the shear connector concerns its structural behavior. When the concrete of the mixed beam and the push-out model was ruptured, it was verified that they were still intact and without major deformations, stating that it is possible to reduce the thickness of 2mm from the carbon steel plate used. The bending test showed that the connector fulfilled the two main functions which it was designed for, and although the beam was submitted to total interaction, considering that there was no differential vertical displacement between the concrete slab and the beam metal. In relation to the average value of the proposed connector, they were satisfactory, considering the ease and low complexity of production and fixation of these on the metal beam table, presenting savings of 45.35% compared to the standard stud bolt connector (19x80mm). In view of the aspects, it is concluded that the element proposed in this study meets the minimum requirements to be used, in view of the ease of production, the lowest cost when compared to the normalized stud bolt connector, besides the real efficiency in maintaining the system with complete interaction (eliminating the effect of relative displacement). It also showed efficiency in transferring the flow shearers generated, allowing the two materials to deform together as a single element.

Keywords: Steel-concrete interaction. Push out. Composite-steel beams. Shear connectors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Eixos norteadores utilizados no estudo.....	18
Figura 2 - Tipos de lajes mistas delimitados pela NBR 8800, com as dimensões mínimas que podem ser empregadas em cada um dos casos	20
Figura 3 - Tipos de pilares mistos de aço e concreto mais empregados nos canteiros de obra	21
Figura 4 - Tipos de vigas mistas de aço e concreto mais difundidas nos canteiros de obra	23
Figura 5 - Primeiro conector de cisalhamento utilizado para transferir esforços cisalhantes gerados	22
Figura 6 - Conector tipo gancho e barra retangular utilizados em conjunto	24
Figura 7 - Comportamento estrutural de vigas mistas, com e sem conector de cisalhamento, submetidas a carregamentos verticais	25
Figura 8 - Diagrama força x deformação utilizado para classificar os conectores de cisalhamento quanto a ductilidade	27
Figura 9 - Tipos usais de conectores de cisalhamento, separados conforme ductilidade (rígida ou flexível)	27
Figura 10 - Linha neutra formada em estrutura mista, correlacionada com a interação dos elementos aço-concreto	29
Figura 11 - Tipos de fissuração na laje de concreto causado pela forma de ruptura do conector de cisalhamento	31
Figura 12 - Esquema para realização do ensaio de push out, proposto pela Eurocode 4	32
Figura 13 - Geometria proposta para o conector do tipo <i>crestbond</i>	33
Figura 14 - Evolução da geometria do conector do tipo <i>perfobond</i> nas últimas três décadas.....	34
Figura 15 - Conector tipo <i>perfobond</i> convencional e tipo Y respectivamente	35
Figura 16 - Conector de cisalhamento do tipo V	36
Figura 17 - Conector de cisalhamento do tipo I proposto pelos autores para realização do estudo.....	37
Figura 18 - Proposição para o conector de cisalhamento do tipo rosqueável	39
Figura 19 - Modo de conexão por aderência.....	40

Figura 20 - Conector formado por vergalhão de aço CA-50A, dobrado em formato de triângulo	41
Figura 21 - Frequência que cada região da viga mista foi instrumentada, conforme autores estudados.....	44
Figura 22 - Pontes de Wheatstone com circuito completo, meia ponte e um quarto de ponte	47
Figura 23 - Processo de corte das chapas de aço-carbono para produção do conector de cisalhamento proposto no estudo.....	50
Figura 24 - Processo de dobra das chapas de aço-carbono para produção do conector de cisalhamento proposto no estudo.....	50
Figura 25 - Esquema proposto para a viga mista de aço-concreto	52
Figura 26 - Projeto de execução da viga metálica com o conector de cisalhamento proposto	53
Figura 27 - Projeto proposto para caixaria da viga mista	55
Figura 28 - Projeto proposto para as ferragens utilizadas na viga mista de aço-concreto	56
Figura 29 - Instrumentação interna na viga mista utilizando-se <i>strain gauges</i>	58
Figura 30 - Instrumentação externa com a utilização de LVDT's para o ensaio de flexão	59
Figura 31 - Esquema proposto para o modelo de <i>push out</i>	60
Figura 32 - Modelo utilizado no ensaio de <i>push out</i> , contendo o conector de cisalhamento proposto	61
Figura 33 - Projeto proposto de caixaria para o modelo de <i>push out</i>	62
Figura 34 - Projeto proposto de caixaria para o modelo de <i>push out</i>	63
Figura 35 - Projeto executivo de ferragens para o ensaio de cisalhamento direto (<i>push out</i>).....	64
Figura 36 - Instrumentação proposta para o ensaio de cisalhamento direto utilizando-se <i>strain gauges</i>	66
Figura 37 - Instrumentação externa utilizando LVDT's para realização do ensaio de cisalhamento direto (<i>push out</i>)	67
Figura 38 - Perfil metálico usado para produção dos pilares utilizados como apoios para a viga mista de aço-concreto durante o ensaio de flexão	69
Figura 39 - Pilar metálico construído para ser utilizado como apoio (de segundo gênero) para as vigas mistas durante o ensaio de flexão em viga mista	71

Figura 40 - Visão global do ensaio de flexão em viga mista	72
Figura 41 - Visão global do ensaio de cisalhamento direto (<i>push out</i>).....	74
Figura 42 - Deslocamento vertical observado no ensaio de flexão em viga mista, com a utilização do conector proposto.....	76
Figura 43 - Deslocamento horizontal observado no ensaio de flexão em viga mista, com a utilização do conector proposto	77
Figura 44 - Tipos de deslocamentos possíveis causados através da aplicação de carga no ensaio de flexão em vigas mistas de aço-concreto	78
Figura 45 - Dados coletados através da instrumentação proposta para observar possíveis deslocamentos entre a laje de concreto e viga metálica	79
Figura 46 - Microdeformações observado nos conectores de cisalhamento, durante o ensaio de flexão em viga mista através da utilização de <i>strain gauges</i>	80
Figura 47 - Fissuras na laje de concreto, causadas pela aplicação de carga	81
Figura 48 - Rompimento da laje de concreto e verificação do comportamento do conector de cisalhamento proposto.....	82
Figura 49 - deslocamento vertical observado entre o perfil metálico e as lajes de concreto no ensaio de cisalhamento direto	83
Figura 50 - Deslocamento horizontal observado entre o perfil metálico e as lajes de concreto no ensaio de cisalhamento direto	84
Figura 51 - Microdeformação observada nos conectores de cisalhamento, durante o ensaio cisalhamento direto, através da utilização de <i>strain gauges</i>	85
Figura 52 - Modelo de <i>push out</i> após o ensaio de cisalhamento direto	86
Figura 53 - Rompimento do modelo de <i>push out</i> e verificação do comportamento do conector de cisalhamento proposto, bem como da armadura longitudinal e transversal	87
Figura 54 - Verificação das soldas através da utilização de <i>spray</i> penetrante e revelador	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Autores pesquisados para propor a instrumentação utilizada no ensaio de viga mista de aço-concreto, bem como localização de tais instrumentações	43
Tabela 2 - Autores pesquisados para propor a instrumentação utilizada no ensaio de <i>push out</i>	45
Tabela 3 - Caracterização das propriedades mecânicas do concreto utilizado para moldar a viga mista e o modelo de <i>push out</i>	75
Tabela 4 - Custo para compra e fixação do conector normatizado pela NBR 8800 ..	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

EUROCODE - *European Committee for Standardization*

LVDT - *Linear Variable Differential Transformer*

SG - *Strain Gauge*

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS MISTOS	18
2.1.1 Lajes mistas (<i>steel deck</i>)	19
2.1.2 Pilares mistos	20
2.1.3 Vigas mistas	22
2.2 CONECTORES DE CISALHAMENTO	23
2.2.1 Histórico	23
2.2.2 Comportamento estrutural	25
2.2.2.1 Classificação dos conectores de cisalhamento	26
2.2.2.2 Interação e conexão entre aço e concreto	28
2.2.2.3 Transferência de forças de cisalhamento na interface aço-concreto	30
2.2.3 Ensaio de <i>push out</i> e flexão em viga mista	32
2.2.4 Novos conectores de cisalhamento propostos pela literatura	33
2.2.4.1 Conector <i>Crestbond</i> e <i>Perfobond</i>	33
2.2.4.2 Conector tipo Y <i>perfobond</i>	35
2.2.4.3 Conector de cisalhamento tipo V	36
2.2.4.4 Conector I	37
2.2.4.5 Conector rosqueável	38
2.2.4.6 Conexão por aderência	39
2.2.4.7 Conector de cisalhamento com barras de aço CA-50 A.....	40
2.2.4.8 Comportamento dos conectores estudados	41
2.3 INSTRUMENTAÇÃO DA LITERATURA.....	42
2.3.1 Instrumentação em vigas mistas	43
2.3.2 Instrumentação em ensaios de cisalhamento direto (<i>push out</i>)	45
2.3.3 Extensômetros elétricos	46
2.3.3.1 Circuito de medição.....	46
2.3.3.2 Cuidados para instrumentação.....	47
3 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS	48
3.1 ASPECTOS GERAIS	48
3.2 CONECTOR DE CISALHAMENTO.....	48
3.2.1 Produção do conector de cisalhamento	49

3.2.1.1 Corte das chapas metálicas	49
3.2.1.2 Dobra dos conectores de cisalhamento	50
3.3 VIGA MISTA DE AÇO-CONCRETO	52
3.3.1 Produção da viga metálica	52
3.3.2 Caixaaria da viga	54
3.3.3 Ferragens da viga.....	56
3.3.4 Instrumentação da viga mista	57
3.3.4.1 Instrumentação interna.....	58
3.3.4.2 Instrumentação externa.....	59
3.4 MODELO PARA O ENSAIO DE <i>PUSH OUT</i>	59
3.4.1 Produção do modelo ensaiado	60
3.4.2 Caixaaria do <i>push out</i>.....	61
3.4.3 Ferragens do <i>push out</i>.....	64
3.4.4 Instrumentação do <i>push out</i>	65
3.4.4.1 Instrumentação interna.....	65
3.4.4.2 Instrumentação externa.....	67
3.5 CONCRETAGEM DA VIGA MISTA E DO MODELO DE <i>PUSH OUT</i>	67
3.6 ENSAIOS	69
3.6.1 Ensaio de flexão na viga mista	69
3.6.1.1 Pilar metálico para ensaio de flexão.....	69
3.6.1.1.1 Produção do blanque metálico	70
3.6.1.1.2 Confecção do pilar.....	70
3.6.1.2 Ensaio de flexão na viga mista	71
3.6.2 Ensaio de <i>push out</i>	73
3.7 VIABILIDADE ECONÔMICA	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1 INSTRUMENTAÇÃO PROPOSTA PELO AUTOR.....	75
4.3 ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGA MISTA.....	75
4.3.1 Deslocamento vertical da viga mista (flecha)	76
4.3.2 Deslocamento horizontal da viga mista	77
4.3.3 Deslocamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto (<i>uplift</i>)	77
4.3.4 Microdeformações causadas nos conectores de cisalhamento submetidos ao ensaio de flexão	79

4.3.5 Avaliações pós-ensaio	80
4.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO (<i>PUSH OUT</i>)	82
4.4.1 Deslocamento vertical do perfil metálico em relação a laje de concreto ..	83
4.4.2 Deslocamento horizontal das lajes de concreto	84
4.4.3 Microdeformações causadas nos conectores de cisalhamento submetidos ao ensaio cisalhamento direto	85
4.4.4 Avaliações pós-ensaio	86
4.5 VIABILIDADE ECONÔMICA	88
5 CONCLUSÃO	90
5.1 AQUISIÇÃO DE DADOS E INSTRUMENTAÇÃO PROPOSTA	90
5.2 CONECTOR DE CISALHAMENTO PROPOSTO	90
5.3 ENSAIOS REALIZADOS.....	91
5.4 VIABILIDADE ECONÔMICA	92
5.5 CONCLUSÃO FINAL.....	92
6 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

A crescente evolução das técnicas e materiais utilizados na construção civil está cada vez mais evidente em canteiros de obra e ainda mais difundida nas universidades por meio de pesquisas voltadas para o ambiente construído. Além da evolução, a otimização de técnicas já existentes mediante melhorias contínuas, ou a junção entre materiais, é uma das formas de se obter maior eficiência nos processos.

Fora do Brasil, em países da Europa e América do Norte, essas tecnologias já encontram uma atmosfera muito mais favorável fazendo parte do cotidiano das construtoras, e por consequência, de profissionais ligados à área. No Brasil, seja por falta de incentivo do governo em novas tecnologias para aprimorar a construção, ou pelo descaso de empresas ligadas ao ramo, ou ainda pelo simples fato de se ter medo e receio do desconhecido, preferindo-se a utilização de técnicas já consolidadas, essas tecnologias ainda se deparam com um cenário de difícil difusão e aceitação (PEREIRA; BECK; EL DEBS, 2017; ATAEI; BRADFORD, 2016).

A utilização de elementos mistos de aço e concreto é um novo e ainda pouco explorado caminho para a engenharia civil no cenário brasileiro atual. Os dois materiais, aço e concreto, são diferentes, porém, complementares. O concreto possui elevada resistência à compressão, alta rigidez e ótima proteção contra corrosão e incêndios. Por outro lado, o aço possui elevada resistência à tração e alta esbeltez. Além disso, os materiais apresentam coeficiente de dilatação térmico muito próximo, sendo assim, não ocasionam deformações térmicas diferenciais significativas (BALASUBRAMANIAN; RAJARAM, 2016; LIU et al., 2016; PATHIRANA et al., 2015).

Além disso Sadeghian, Hristozov e Wroblewski (2018) e Abbass, Adi e Karkare (2011) complementam que vigas mistas de aço e concreto criam uma solução estrutural muito mais eficiente comparada à utilização destes materiais isoladamente, tendo em vista que tais materiais são colocados em locais onde se possa tirar maior proveito possível de suas características, ou seja, o aço é posicionado no local tracionado e o concreto, por sua vez, no local comprimido do elemento estrutural.

Um dos motivos para que as estruturas metálicas sejam tão pouco difundidas no país está diretamente ligada ao custo, que se comparado ao concreto armado é relativamente mais caro. Porém a utilização de vigas mistas de aço e concreto trazem inúmeras vantagens quando comparadas ao concreto armado, dentre elas pode-se citar: a redução do cronograma de execução do projeto, sendo que os perfis metálicos

podem ser fixados em um curto espaço de tempo, o qual seria muito maior com a utilização de fôrmas de madeira convencional; diminuição das cargas lançadas nas fundações e a menor deformação da estrutura (HOSSEINPOUR et al., 2018).

A principal dificuldade encontrada na utilização de vigas mistas de aço-concreto, está em garantir a real interação entre os componentes, fazendo com que ambos se comportem como um só. Quando ocorre interação total entre a viga de aço e a laje de concreto pode-se considerar nulo o escorregamento relativo entre os dois, ocasionando apenas uma linha neutra. Por outro lado, quando a interação entre os materiais é parcial o escorregamento relativo é maior, fazendo com que ocorra duas linhas neutras, uma na laje e outra no perfil metálico. Desta forma, a escolha do tipo de conector e o correto dimensionamento são de grande importância, pois é por meio deles que se determina o grau de interação e a maneira como os esforços normais e de cisalhamento são transmitidos entre os materiais de aço e concreto (WANG B. et al., 2018; BARBOSA et al., 2016; TAIG et al., 2015; SHARIATI et al., 2012).

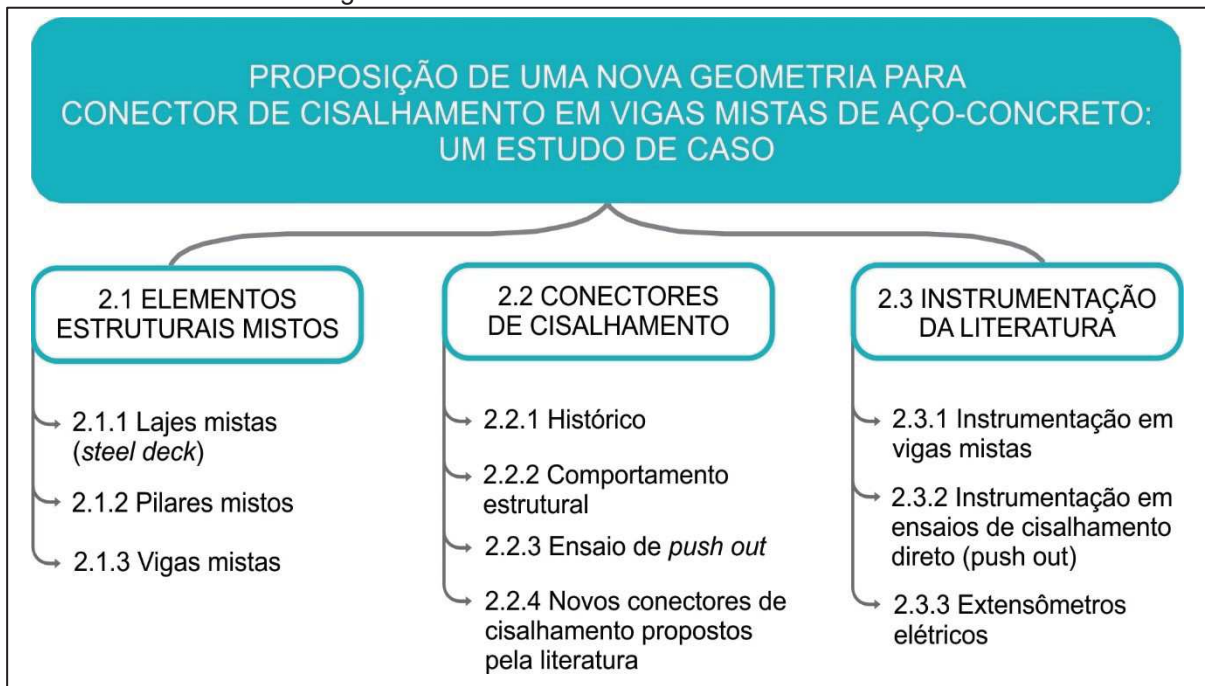
A grande maioria dos estudos ligados às estruturas mistas de aço-concreto trabalham com simulações por meio de elementos finitos para entender o comportamento do elemento proposto, isso porque os estudos realizados de forma experimental demandam maior investimento financeiro, além de possuírem grande complexidade na execução. Alia-se a este fato a dificuldade de encontrar, ou mesmo propor, uma metodologia de aquisição de dados que seja viável e eficiente para entender os principais comportamentos do objeto de estudo.

Assim sendo, este estudo possui como principal objetivo a proposição e a validação da eficiência de uma nova geometria para conector de cisalhamento que possa ser utilizado em vigas mistas de aço-concreto, tendo como base ensaios experimentais. Dessa forma, como objetivos específicos estão o desenvolvimento e produção do conector de cisalhamento, bem como o projeto e construção de uma viga mista e modelo de *push out* para avaliar a eficácia do elemento quando submetido a ensaio de flexão e cisalhamento direto. Prevê ainda a realização de um levantamento orçamentário (viabilidade econômica) do conector, utilizando da comparação com o modelo já existente e normatizado (*stud bolt*). Por fim, o estudo busca apresentar de forma clara e objetiva o método de como a construção e instrumentação dos aparatos foi realizada para que os leitores possam utilizar essa pesquisa como base para projetos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente pesquisa bibliográfica será fundamentada nos eixos norteadores da Figura 1.

Figura 1 - Eixos norteadores utilizados no estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS MISTOS

A junção aço-concreto visa fundamentalmente o melhor aproveitamento mecânico e físico dos materiais. De acordo com Lemes et al. (2015), e Nie, Fan e Cai (2004), utilizando-se estrutura mista observa-se um ganho em relação a resistência, rigidez, custo-benefício, além da proteção dos elementos metálicos a corrosão e incêndio.

As estruturas mistas também possuem vantagens durante a execução. No período de tempo em que o concreto ainda não atingiu resistência suficiente para se alto portar, as cargas podem ser suportadas pelos perfis metálicos e fôrmas, reduzindo-se gastos com escoramentos e, conseqüentemente, aumentando o espaço livre para circulação na obra pelos operários (HOSSEINPOUR et al., 2018).

De acordo com Tristão e Munaiar Neto (2005), existem três tipos principais de sistemas compostos que vêm sendo utilizados nas obras de engenharia civil: lajes

mistas de aço-concreto (lajes de concreto com fôrma de aço incorporada); pilares mistos de aço-concreto (pilares de aço revestidos ou protegidos por concreto ou preenchidos com concreto) e; vigas mistas de aço-concreto (laje de concreto sobre vigas de aço).

2.1.1 Lajes mistas (*steel deck*)

O sistema de laje mista *steel deck* é muito conhecido e largamente utilizado em países do primeiro mundo para a construção de *shopping centers*, edifícios residências e comerciais, hotéis, hospitais e garagens. No Brasil esse sistema vem ganhando espaço com a inserção de novas técnicas nos canteiros de obras (MACHADO, 2012).

Lajes mistas de aço e concreto, também denominadas de lajes com fôrma de aço incorporada, são aquelas em que a fôrma de aço é congregada ao sistema de sustentação das cargas, atuando como suporte para as ações permanentes e sobrecargas antes da cura do concreto, funcionando também como armadura de tração parcial ou total da laje após a cura total do concreto (QUEIROZ; PIMENTA; MARTINS, 2012).

A Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004) afirma ainda que a fôrma de aço deve ser capaz de transmitir o cisalhamento longitudinal na interface aço e concreto por meio de ligação mecânica por mossas nas fôrmas de aços trapezoidais ou ligação por atrito devido ao confinamento do concreto nas fôrmas de aço com cantos reentrantes, ou ainda, por ancoragem nos extremos proporcionada por conectores soldados, não sendo permitido que a aderência química natural entre os materiais seja considerada como forma de transmissão do cisalhamento longitudinal.

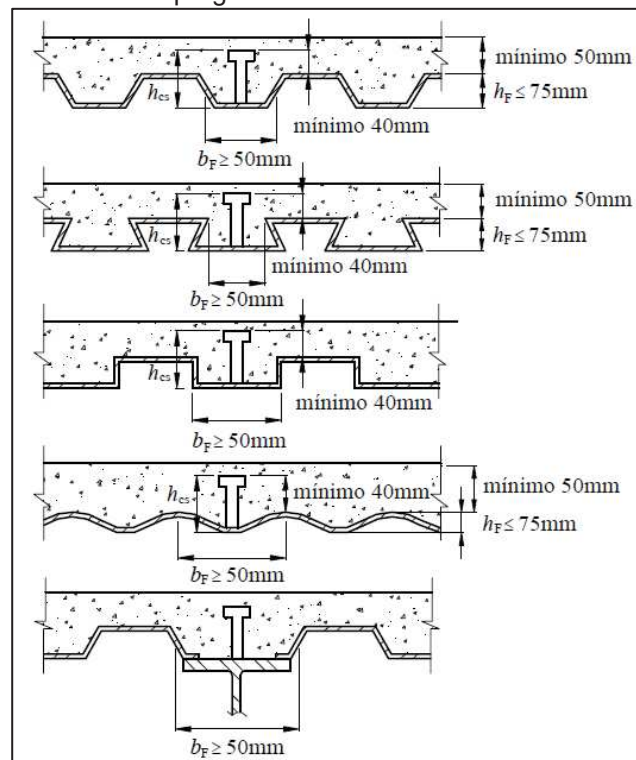
A NBR 8800, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008) delimita cinco tipos de lajes mistas de aço e concreto em seus métodos de cálculo, as mesmas podem ser observadas na Figura 2.

Quanto as vantagens da utilização de lajes mistas de aço e concreto, alguns autores como Arrayago et al. (2018), Machado (2012), e Pannoni e Silva (2010) citam algumas delas:

- Fôrma da laje funciona como armadura positiva;

- Diminuição ou até eliminação do escoramento, tornando o canteiro de obra mais organizado, excluindo o tempo gasto com montagem e desmontagem dos escoramentos;
- Elementos leves e de fácil manuseio e instalação;
- Elimina a utilização de madeira que é responsável por uma parcela significativa do custo total de uma estrutura de concreto;
- Facilidade de instalação e maior rapidez construtiva;
- Apresenta facilidade para a passagem de dutos das diversas instalações, favorecendo também a fixação de forros;
- Durante a montagem transforma-se em plataforma de serviço e proteção aos operários que trabalham nos andares inferiores durante a construção.

Figura 2 - Tipos de lajes mistas delimitados pela NBR 8800, com as dimensões mínimas que podem ser empregadas em cada um dos casos



Fonte: NBR 8800, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

2.1.2 Pilares mistos

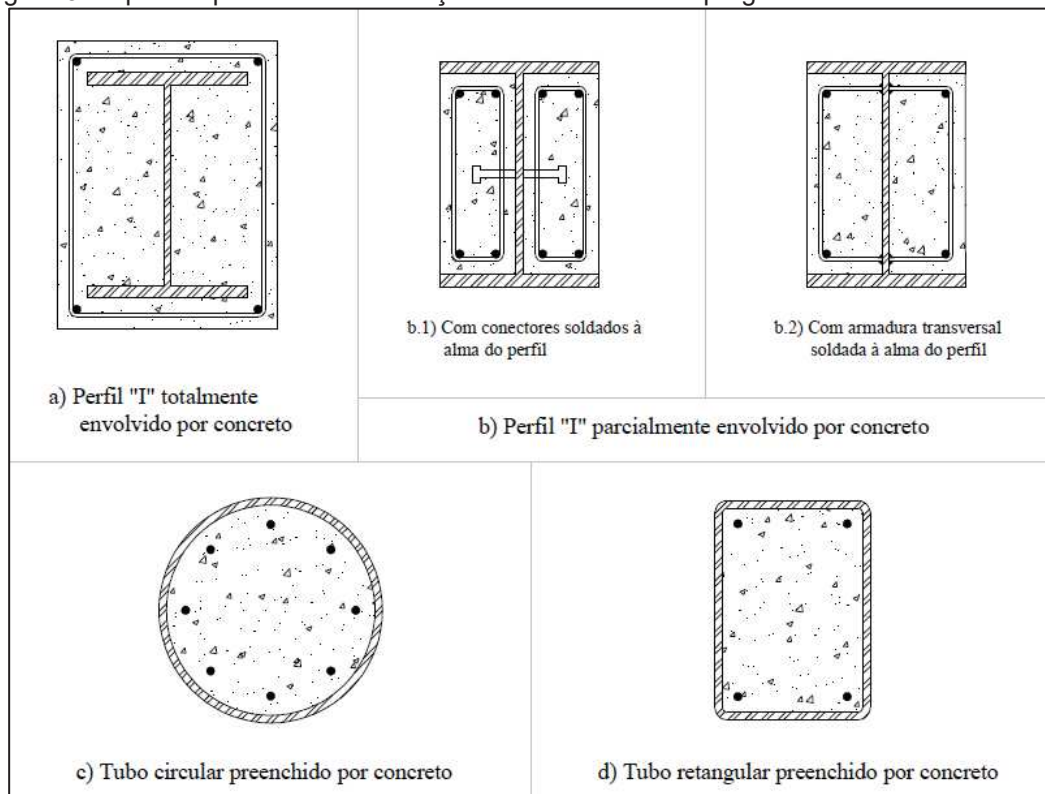
Os pilares mistos são elementos estruturais sujeitos a compressão pura ou flexo-compressão, constituídos por perfis de aço que são envolvidos total ou parcialmente por concreto, executados de maneira que o aço e o concreto trabalhem

em conjunto, sem que haja escorregamento relativo significativo entre os componentes (PARK et al., 2017; RODRIGUES et al., 2017; CHAVES, 2013).

A utilização de pilares mistos de aço-concreto surgiu com o objetivo de proteger o elemento metálico contra incêndios, pois tal fenômeno sempre foi uma problemática para as estruturas de aço. Inicialmente, aplicava-se um concreto de baixa resistência sobre o perfil de aço e os efeitos de resistência gerados pela junção do material eram totalmente desprezados. Porém, com o passar dos anos observou-se que utilizando concreto de maior resistência seria possível aumentar a resistência e ainda gerar maior rigidez ao pilar (SIMÕES; ROCHA; MUNAIAR NETO, 2018; TAO et al., 2017).

Existe uma gama de geometrias utilizadas em pilares mistos. Entre os mais utilizados pode-se citar o pilar misto de perfil I totalmente envolvido por concreto (Figura 3A); perfil I parcialmente envolvido por concreto (Figura 3B); tubo de aço (Figura 3C) e perfil retangular preenchidos com concreto (Figura 3D).

Figura 3 - Tipos de pilares mistos de aço e concreto mais empregados nos canteiros de obra



Fonte: Fabrizzi (2007).

De acordo com Queiroz, Pimenta e Martins (2012), além das vantagens que os pilares mistos proporcionam em relação à variedade disponível de geometrias dos elementos e a possibilidade de obtenção de benefícios arquitetônicos e econômicos,

pode-se ainda citar inúmeras vantagens em relação às estruturas de concreto armado: possibilidade da eliminação de fôrmas e escoramento; redução do prazo de execução; redução do peso próprio da estrutura, acarretando fundações mais econômicas e aumento da precisão dimensional da construção. E com relação às estruturas de aço: redução do consumo de aço estrutural; redução das proteções contra incêndio e corrosão e aumento da rigidez da estrutura.

2.1.3 Vigas mistas

As vigas de aço e concreto são utilizadas como sistemas estruturais desde 1920 na Europa e América do Norte. A utilização de tal técnica não ocorreu de forma pensada e sim por consequência da utilização de lajes de concreto armado apoiadas sobre vigas metálicas, onde cada componente resistia e se deformava de forma independente de acordo com sua rigidez (SALES et al., 2015).

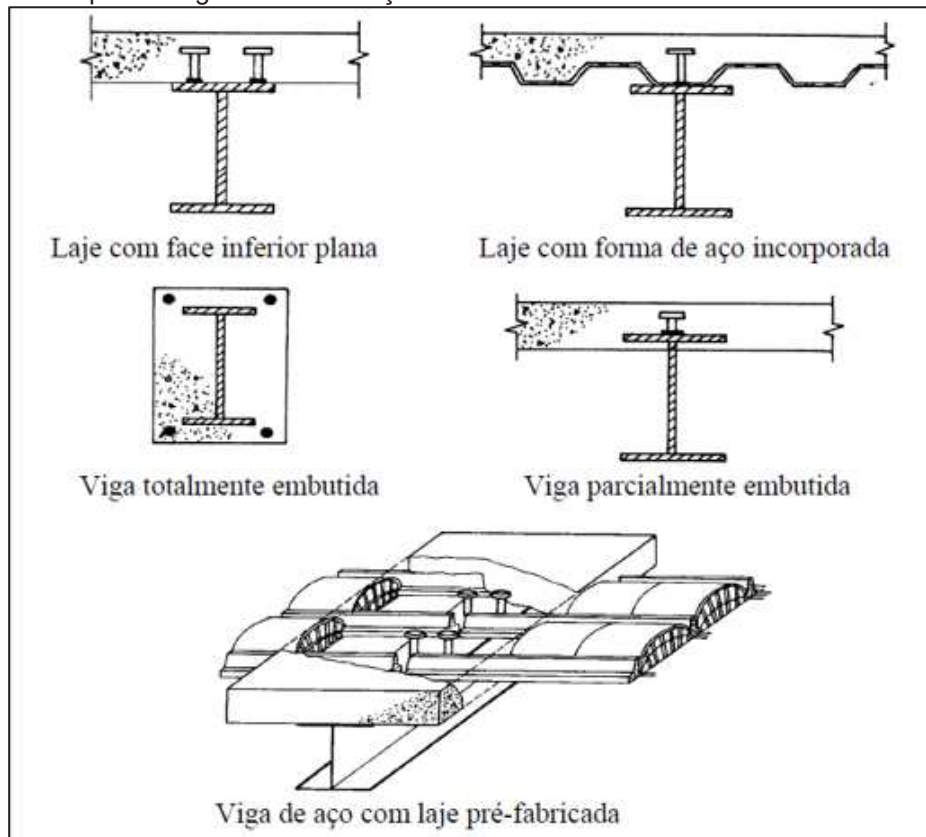
Wang J. et al., (2018) definem viga mista como um perfil de aço associado a uma laje de concreto, de tal forma que se estabeleça um trabalho em conjunto dos materiais para resistir aos esforços de flexão. Essa associação se dá por meio de elementos metálicos fixados com solda na mesa superior da viga e que ficam embutidos na laje de concreto, denominados conectores de cisalhamento. A Figura 4 demonstra alguns tipos usuais de vigas mistas.

As vigas mistas podem ser simplesmente apoiadas ou com continuidade nos apoios. Quando se faz uso de vigas mistas simplesmente apoiadas as mesmas contribuem para que haja uma maior eficiência do sistema misto, isso porque a viga de aço trabalhará predominantemente à tração e a laje de concreto à compressão. Já nos casos em que as vigas são contínuas gera-se nos apoios momento negativo fazendo com que o aço e o concreto não fiquem mais fixados nos locais onde possuem melhor desempenho estrutural (AMARAL et al., 2018; EL-ZOHAIRY et al., 2017).

Os autores expressam ainda que o método construtivo da laje influencia o comportamento estrutural das vigas mistas, isso porque quando há escoramento das lajes no momento da construção, as vigas não recebem carregamento durante a fase construtiva. Porém, quando as lajes não possuem escoramentos, as vigas de aço recebem tais carregamentos, inclusive o peso da laje. Neste caso, como o concreto ainda não atingiu sua resistência, o sistema misto não está constituído, fazendo da

viga de aço um elemento isolado, sendo determinante a verificação de flecha e estabilidade lateral.

Figura 4 - Tipos de vigas mistas de aço e concreto mais difundidas nos canteiros de obra



Fonte: Malite (1990).

2.2 CONECTORES DE CISALHAMENTO

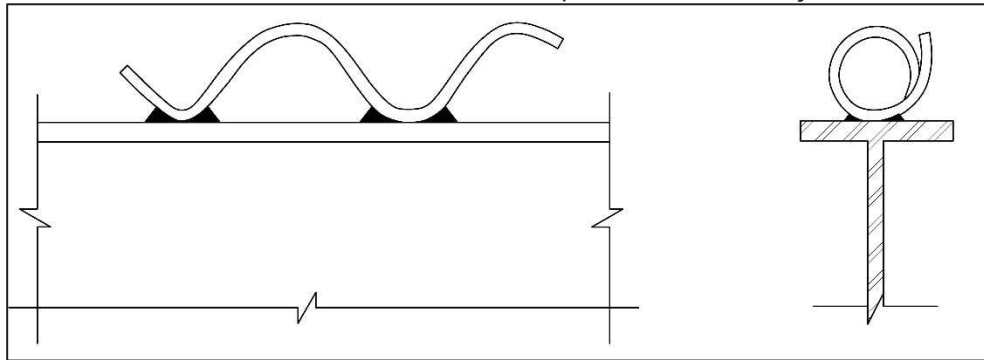
2.2.1 Histórico

Os primeiros estudos encontrados sobre a utilização de conectores de cisalhamento foram realizados na Suíça. A geometria inicial proposta pelo autor trabalhava de forma a transferir as forças de cisalhamento da laje para viga de aço com o uso de barras redondas dispostas sobre a viga com o formato de hélices, como demonstra a Figura 5 (VIEST, 1961).

Posteriormente dois novos tipos de conectores ganharam atenção em estudos realizados por europeus, sendo eles: conectores na forma de ganchos e conectores rígidos na forma de barras retangulares (Figura 6). A utilização desses dois conectores se dava em conjunto para restringir o deslizamento horizontal entre a laje e a viga de

aço, assim como evitar o afastamento vertical entre o aço e concreto, efeito esse denominado *uplift* (CHAPMAN, 1964).

Figura 5 - Primeiro conector de cisalhamento utilizado para transferir esforços cisalhantes gerados

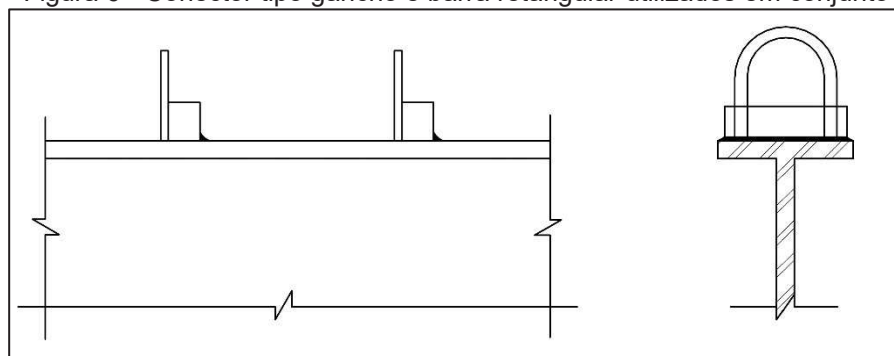


Fonte: Adaptado de Viest (1961).

De acordo com a pesquisa de Chaves (2009), enquanto os europeus estudavam conectores rígidos e utilizações combinadas, os norte-americanos voltavam estudos para os conectores flexíveis, principalmente do tipo U de aço laminado e *stud*.

Até meados dos anos 60 os estudos realizados levavam em consideração apenas teorias aplicadas ao concreto armado convencional. Quando se constatou, de forma experimental, que não existia uma interação completa entre a viga de aço e a laje de concreto, novas teorias foram apresentadas considerando o escorregamento relativo entre os dois materiais (VIEST, 1961).

Figura 6 - Conector tipo gancho e barra retangular utilizados em conjunto



Fonte: Adaptado de Chapman (1964).

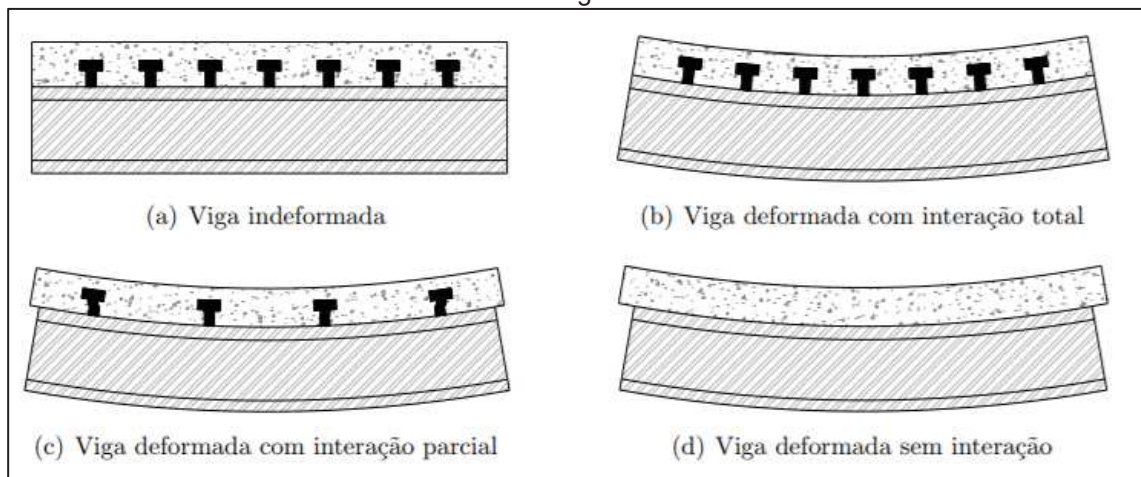
Deste modo surge na Inglaterra a primeira teoria com fundamentação na análise elástica de vigas mistas. A teoria apresentou uma equação para o cálculo das tensões no concreto e no aço, oriundas apenas da flexão. Tal proposição admitia que

o concreto não resistisse a esforços de tração, sendo que a distribuição das tensões na seção mista se dava de forma linear e sem deslizamentos relativos entre os materiais. Após a realização de testes com vigas mistas que possuíam conectores de cisalhamento, constatou-se que o deslizamento que ocorria na interface aço-concreto era inerente, ou seja, de vital importância para eficiência estrutural. Desde então várias teorias elásticas vêm sendo desenvolvidas, considerando o escorregamento para cálculo de deformações e tensões (CHAVES, 2009).

2.2.2 Comportamento estrutural

Para que uma estrutura seja considerada mista deve-se existir uma ligação na interface entre os elementos de aço e concreto que seja capaz de resistir aos fluxos cisalhantes gerados, permitindo que os dois materiais se deformem em conjunto como um único elemento. Se não existe conexão na interface dos dois materiais ambos se deformam de modo independente provocando deslizamentos relativos, como pode ser observado na Figura 7 (CHAVES; MALITE, 2010).

Figura 7 - Comportamento estrutural de vigas mistas, com e sem conector de cisalhamento, submetidas a carregamentos verticais



Fonte: Lemes (2018).

Como não existe uma interação ou aderência natural entre os dois materiais, para que o escorregamento na interface seja impedido ou minimizado é necessária a utilização de conectores de cisalhamento (CLASSEN, 2018; LOWE; DAS; CLIFTON, 2014).

A utilização de conectores de cisalhamento é fundamental para que ocorra o comportamento misto entre aço e concreto. De acordo com Hassanieh, Valipour e Brandford (2018), tais elementos possuem duas funções principais:

- Transmitir os esforços de cisalhamento longitudinal que ocorre entre o perfil de aço e a mesa de concreto;
- Não permitir que ocorra deslocamento vertical na interface aço-concreto.

Os autores citam ainda que a primeira função é efetivamente necessária e a segunda pouco considerada, tendo em vista que é muito improvável que a diferença de deslocamento entre a laje e o perfil metálico possa causar deslocamentos entre os elementos estruturais.

2.2.2.1 Classificação dos conectores de cisalhamento

Os conectores de cisalhamento são classificados como rígidos ou flexíveis, dependendo da resposta que o conector dá à ação do fluxo cisalhante longitudinal que ocorre entre o perfil de aço e a laje de concreto. Tal análise da resposta é obtida por meio da relação entre a força do conector e o deslizamento entre laje e viga (LASHEEN; SHAAT; KHALIL, 2018).

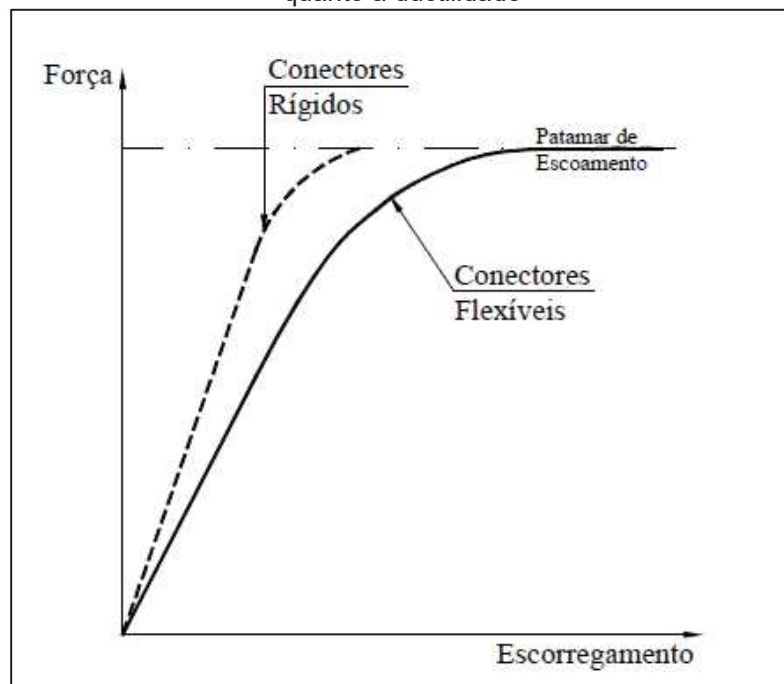
Ainda de acordo com os autores para um conector ser considerado flexível o mesmo deve continuar a se deformar após atingir resistência máxima sem apresentar ruptura, permitindo que os conectores de cisalhamento vizinhos recebam maior força de corte fazendo que atinjam também capacidade total.

Já os conectores rígidos possuem deformação muito pequena quando são submetidos a carregamentos, fazendo com que não apresentem problemas relacionados à fadiga, proporcionando uma conexão na interface aço e concreto praticamente livre de deslizamentos. Porém, a falta de deformação pode ocasionar ruptura frágil, referente ao esmagamento ou cisalhamento do concreto (PEREIRA DA SILVA, 2013).

De acordo com Dutra (2014), se os conectores são dúcteis, ou seja, se deformam mais facilmente, pode-se admitir que ocorra redistribuição de esforços entre os conectores e que todos eles são mobilizados quando há carregamento do elemento misto, podendo-se distribuir uniformemente os conectores sobre o elemento

estrutural. Por outro lado, se os conectores forem rígidos e apresentarem baixa ou nenhuma ductilidade, não se pode mais considerar a hipótese de espaçamento uniforme entre os conectores e a disposição deve ocorrer de acordo com o fluxo de cisalhamento atuante na interface aço-concreto. A Figura 8 apresenta o comportamento de ambos os tipos de conectores quando submetidos a carregamentos.

Figura 8 - Diagrama força x deformação utilizado para classificar os conectores de cisalhamento quanto à ductilidade

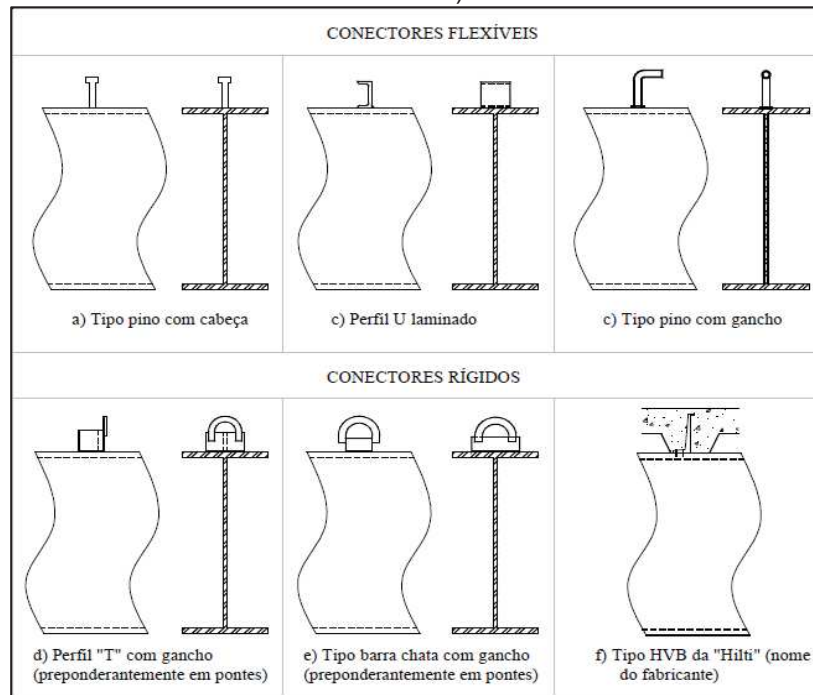


Fonte: Adaptado de Kostic e Stojanovic (2018) e Sales et al. (2015).

Desta forma, Yang e Chen (2018) relatam que um conector de cisalhamento ideal seria aquele que o comportamento é caracterizado por deslizamentos nulos para cargas de serviço e boa ductilidade em estado limite último. Sendo assim as características de um conector rígido são desejáveis quando se tem situações de serviço e as características de conectores flexíveis quando está se trabalhando no estado de limite último.

A NBR 8800, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), considera como conector de cisalhamento normatizado apenas o perfil “U” e o pino com cabeça (*stud*). Porém, muitos são os conectores de cisalhamento existentes utilizados em vigas mistas, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Tipos usuais de conectores de cisalhamento, separados conforme ductilidade (rígida ou flexível)



Fonte: Fabrizzi (2007).

2.2.2.2 Interação e conexão entre aço e concreto

Primeiramente é importante ressaltar a diferença entre grau de conexão e grau de interação. O grau de conexão se refere à resistência da conexão de cisalhamento da viga mista e grau de interação diz respeito ao escorregamento relativo entre os elementos que a compõe (KOTINDA, 2006).

De acordo com David (2007), para se avaliar o grau de conexão entre a laje e o perfil utiliza-se o índice “ η ”. Esse indicador é obtido por meio da relação entre o somatório das resistências de cada conector (situado entre uma seção de momento fletor máximo e a seção adjacente de momento nulo), e a resultante do fluxo de cisalhamento, sendo que este valor deve ser de menor resistência da laje ou perfil.

A equação 1 citada pela NBR 8800, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008) exemplifica o grau de conexão.

$$\eta = \frac{F_{sh}}{F_{sh,min}} \quad (1)$$

Onde:

η é o grau de conexão

F_{sh} é a resistência da conexão de cisalhamento

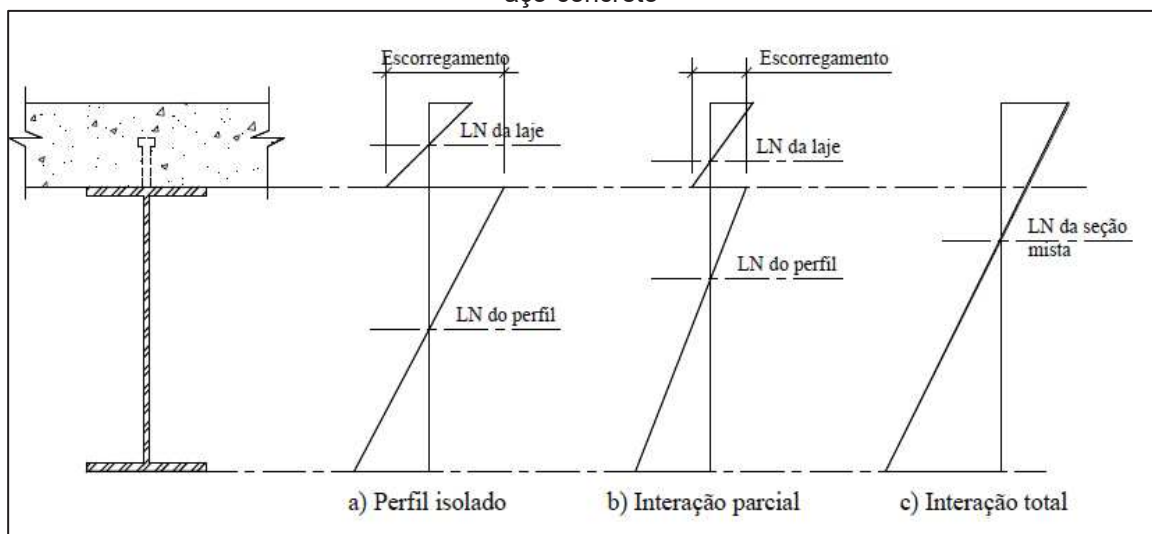
$F_{sh, min}$ é resistência mínima da conexão de cisalhamento para que se tenha conexão completa

Segundo a mesma norma o grau de conexão pode variar de 0,5 até 1, portanto:

- Se $\eta_i \geq 1$ a conexão é completa;
- Se $\eta_i < 1$ a conexão é parcial.

Na concepção de Fabrizzi (2007), no caso de interação parcial ou de perfil isolado (onde não existem conectores de cisalhamento), ocorre a criação de duas linhas neutras, porém uma com mais escorregamento relativo (viga isolada) e outra com menos (viga com interação parcial). Quando a viga é submetida à interação total o autor considera que o deslocamento relativo na interface aço-concreto pode ser desconsiderado, formando apenas uma linha neutra. A Figura 10 demonstra os tipos de linhas neutras que podem, teoricamente, se originar a partir do grau de interação do aço-concreto.

Figura 10 - Linha neutra formada em estrutura mista, correlacionada com a interação dos elementos aço-concreto



Fonte: Adaptado de Yossef e Chen (2018).

Em vigas mistas a interação parcial ocorre quando o estado limite último é a ruptura da conexão e a interação total quando este estado é atingido pela resistência da seção mista à flexão (CLASSEN, 2018).

Desta forma Sebastian et al., (2018) salientam que os conectores de cisalhamento não têm como função apenas a transferência das forças de cisalhamento longitudinal que se forma na interface laje e viga, mas também impedir que ocorra a separação vertical dos dois elementos, movimento denominado “*uplift*”.

2.2.2.3 Transferência de forças de cisalhamento na interface aço-concreto

Durante a transferência de forças de cisalhamento longitudinais na interface ocorrem diversos tipos de esforços sobre os conectores de cisalhamento. Como citado a deformação que ocorre entre a laje e a viga causa deformação nos conectores e o mesmo aplica uma força sobre o concreto em direção ao meio do vão (KOTINDA, 2006).

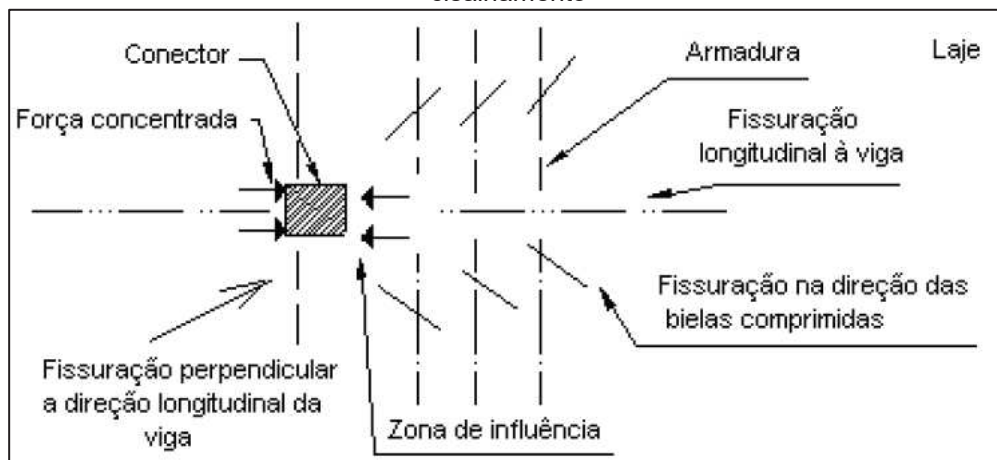
Desta forma, David (2007) relata que existem diversas formas de ruptura do conector quando ocorre a transferência das forças de cisalhamento longitudinal da laje para a viga:

- Se o concreto obtiver rigidez menor que o conector irá fissurar antes que o conector plastifique, causando excentricidade. Como consequência, as tensões normais no pino do conector aumentarão muito mais rápido que as tensões de cisalhamento, levando-o à ruptura.
- Por outro lado, se o concreto for mais rígido que o conector, se reduz o momento no conector. Assim, também reduzirá a zona de compressão triaxial, que diminui a altura efetiva do conector, fazendo com que ocorra ruptura no concreto na zona de compressão triaxial que, conseqüentemente, aumenta a excentricidade, já que se reduz a rigidez do concreto. Sendo assim, o mecanismo de ruptura é o mesmo descrito anteriormente.

Segundo estudos desenvolvidos por Oehlers (1989), outro fator importante que deve ser destacado é o modo como ocorre à fissuração na laje de concreto, que está diretamente associada à ruptura do conector de cisalhamento, pois reduz gradualmente a resistência e rigidez na zona de compressão triaxial.

Segundo o autor podem ocorrer três tipos de fissuração na laje de concreto (Figura 11): fissuração na direção das bielas comprimidas, fissuração perpendicular à direção longitudinal à viga e fissuração longitudinal à viga, sendo a última a mais prejudicial ao concreto, pois tem como consequência a ruptura do conector. Ainda de acordo com o autor, a utilização de armadura transversal não impede que o concreto rompa, apenas limita o desenvolvimento de fissuras.

Figura 11 - Tipos de fissuração na laje de concreto causada pela forma de ruptura do conector de cisalhamento



Fonte: Adaptado de Oehlers (1989).

Alguns autores estudaram o comportamento de separação na interface aço-concreto. Em seus estudos Lowe, Das e Clifton (2014) analisaram o comportamento de tal interface, porém com uma configuração diferente de ensaio, na medida em que era horizontal e possuía apenas um plano de cisalhamento. Utilizou-se conector *stud* com dimensões de 19mm de espessura por 125mm de altura, espaçados a cada 300mm entre si.

Os autores ensaiaram então cinco vigas mistas, sendo que todas as vigas falharam por meio de separação longitudinal ao longo da linha de conectores. Quatro vigas foram carregadas sem interrupções até ocorrer a falha e uma foi carregada ciclicamente e em seguida até ocorrer a falha. O teste demonstrou que a zona de deformação transversal em torno do conector é muito localizada, ou seja, o campo de tensões no concreto na base do conector não é uniforme, ocorrendo alta acumulação de compressão de apenas um dos lados do conector e uma pequena quantidade do outro lado. O teste cíclico por sua vez demonstrou que o comportamento no concreto não foi elástico a baixos níveis de carga.

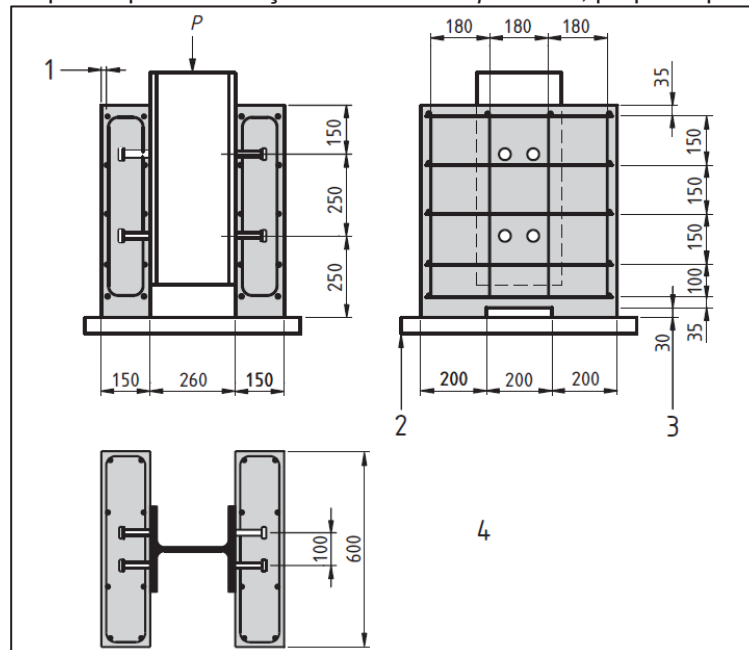
2.2.3 Ensaio de *push out* e flexão em viga mista

Para verificar a real eficiência dos conectores propostos, a resistência dos mesmos é analisada por meio de ensaio padronizado de cisalhamento direto (*push out*) e também de ensaio de flexão em vigas mistas.

Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto e de flexões em vigas mistas possuem algumas diferenças. Em vigas mistas os conectores recebem as solicitações de forma indireta, sendo que a força no conector não é a mesma aplicada à viga, isso porque tal transferência de esforços depende da rigidez dos diversos componentes. Além disso, a não linearidade do aço e as tensões residuais no aço tornam difícil determinar a força real a que o conector está submetido por meio das deformações longitudinais dos mesmos (BRADFORD; OEHLERS, 2002).

De acordo com a Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004), o modelo para realização do ensaio de *push out* consiste em um perfil de aço tipo I que deve estar conectado a duas mesas de concreto por conectores de cisalhamento, sendo que as mesas de concreto devem ser providas de armaduras, conforme Figura 12.

Figura 12 - Esquema para realização do ensaio de *push out*, proposto pela Eurocode 4



Fonte: Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004).

Um carregamento é aplicado ao perfil metálico que desliza em relação às lajes de concreto até que ocorra o colapso da conexão. Durante a realização do ensaio registram-se os deslizamentos relativos que ocorrem na interface aço-concreto, bem como a carga à que o perfil está sendo submetido. Com os dados obtidos é possível realizar o traçado da curva força-escorregamento como foi demonstrado na Figura 8 (DUTRA, 2014).

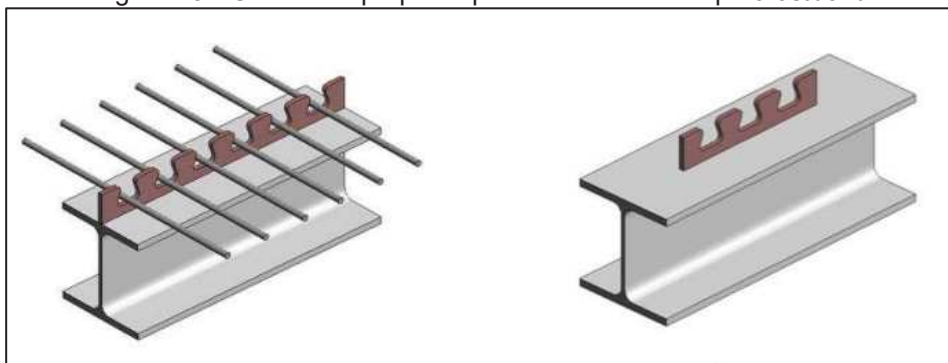
2.2.4 Novos conectores de cisalhamento propostos

Para melhor entender os conectores de cisalhamento que já foram propostos e estudados, bem como os respectivos comportamentos, foi realizado uma pesquisa bibliográfica, a qual pode ser observada nos próximos subitens.

2.2.4.1 Conector *crestbond* e *perfobond*

O conector *crestbond* (Figura 13) consiste de uma chapa plana de aço estrutural com um recorte simétrico caracterizado por saliências e reentrâncias trapezoidais, que proporcionam resistência ao cisalhamento longitudinal e previnem a separação transversal entre o perfil metálico e os componentes de concreto (*uplift*). Além disso, as aberturas no conector facilitam a disposição das barras de armadura no concreto. A proposição deste conector foi feita por Veríssimo et al. (2007).

Figura 13 - Geometria proposta para o conector do tipo *crestbond*



Fonte: Veríssimo et al. (2007).

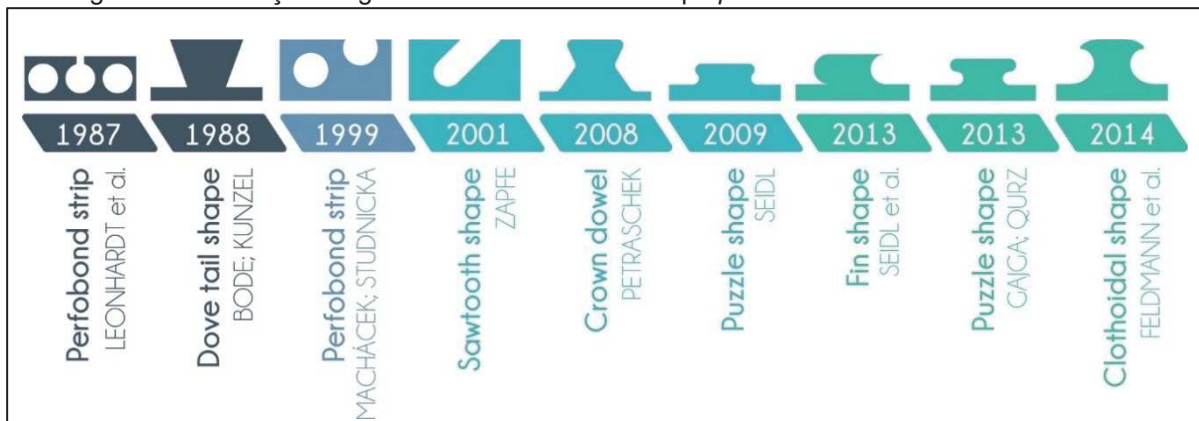
O autor realizou 26 ensaios *push out*, agrupados em quatro séries para verificar a resistência do conector proposto, sendo que o comportamento do novo conector foi analisado e comparado com o dos conectores *perfobond* e *stud*. Observou-se que o

conector *crestbond* apresenta boa capacidade de retenção de carga após o pico, o que não ocorre com o *stud*. Para a mesma faixa de resistência do concreto, um único conector *crestbond* apresenta resistência equivalente à de quatro *studs*.

Alves et al. (2015), por sua vez, estudaram o comportamento de tal conector quando empregado a vigas mistas de aço-concreto e constataram que não houve nenhuma separação vertical entre a laje e o perfil metálico, provando ser capaz de garantir a interação total entre as seções de aço-concreto.

O conector *perfobond* vem passando por diversas modificações geométricas durante as últimas três décadas. Um estudo realizado por Kopp et al. (2018) exemplificou um pouco destas modificações. A evolução das peças pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Evolução da geometria do conector do tipo *perfobond* nas últimas três décadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando-se a Figura 14, nota-se que o desenvolvimento do conector do tipo *perfobond* surgiu na década de 80. Segundo Kopp et al. (2018), o conector passou a existir com a ideia de facilitar a transferência das forças de cisalhamento entre a viga de aço e a laje de concreto, utilizando-se uma placa vertical com furos (pensados para o transpasse das armaduras). Outro ponto importante consistia no método de fixação do elemento, que poderia ser fixado com solda normal, diferente do conector padrão até então utilizado (*stud bolt*) que usava soldagem por eletrofusão.

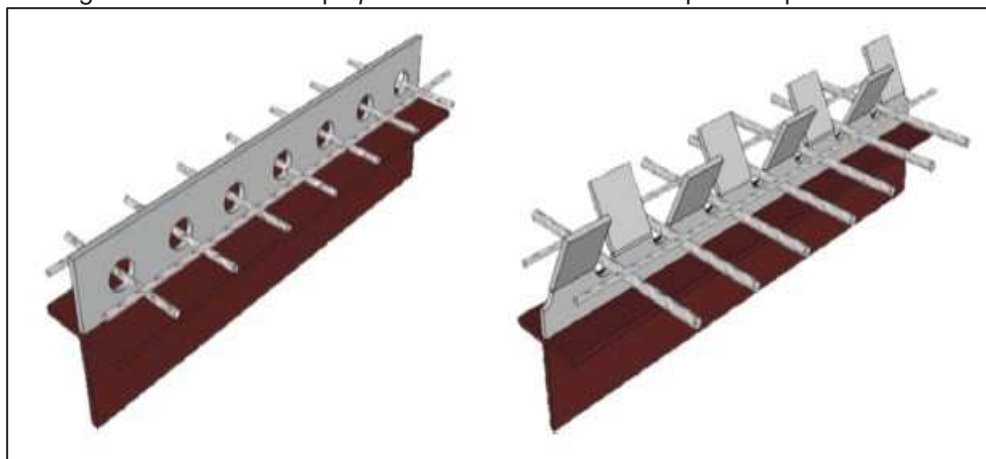
Desde então, a evolução do conector deu-se pensando em uma geometria que mais resistisse aos esforços que a viga mista estaria solicitada, mas levando-se em conta também a produção de tais conectores, surgindo dessa forma os conectores do tipo “*shape*” que permitem a fabricação dos conectores com corte a gás com nenhum,

ou quase nenhum, desperdício de material. Além disso, a geometria é de fácil instalação levando a redução dos custos e do tempo (KOPP et al., 2018).

2.2.4.2 Conector tipo Y *perfobond*

O conector tipo Y *perfobond* tem sido largamente estudado por Kim et. al (2018), Kim et al. (2017), Kim et al. (2015), Kim et. al. (2014), e Kim et al. (2013). O conector *perfobond* tipo Y foi proposto pelos autores para complementar as características estruturais e também para facilitar a trabalhabilidade com o mesmo, se comparado com o conector *perfobond* convencional. Ambos podem ser observados na Figura 15.

Figura 15 - Conector tipo *perfobond* convencional e tipo Y respectivamente



Fonte: Kim et al. (2017).

Para a fabricação do conector tipo Y o topo da nervura convencional é dobrado em forma de Y, além disso, a nervura é cortada em um semicírculo para substituir o furo circular convencional, onde as barras de reforço transversais são colocadas, formando espaço suficiente para trabalhabilidade.

Em relação aos conectores de *perfobond* convencionais o de tipo Y possui algumas vantagens relatadas pelos autores. Apresenta melhor trabalhabilidade, modo de falha e rigidez. Além disso, pode garantir desempenho positivo contra força de separação vertical por causa das peças de dobras individuais em um ângulo particular.

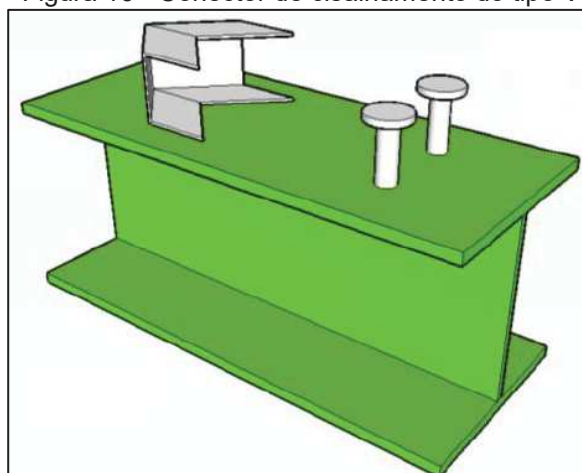
Para a verificação da real eficiência dos conectores os autores realizaram ensaios de *push out*. O conector tipo Y ensaiado possuía uma largura de 80mm, altura de 100mm, espessura de 10mm, e um ângulo de dobra em forma de Y de 60°. A

resistência a compressão do concreto adotada foi de 40MPa, e adicionou-se ao sistema dois vergalhões com diâmetro de 16mm. Os autores constataram então que o conector era rígido na fase linear da curva (carregamento de serviço) e dúctil após a seção linear da curva (estado limite último), sendo considerado como conector ideal.

2.2.4.3 Conector de cisalhamento tipo V - estudo de Bezerra et al.

O conector de cisalhamento V é uma variação mais rígida do conector U, mantendo a forte interação entre os dois elementos estruturais (aço-concreto), mas reduzindo a concentração de estresse tanto no concreto como na viga, se comparado com o *stud*. O estudo experimental foi realizado por meio de ensaios de *push out*. Todos os conectores foram ensaiados com uma altura padrão fixada em 130mm. Os conectores de cisalhamento V foram produzidos com espessuras de 2,65 e 3,75mm (V-2,65mm e V-3,75mm). O diâmetro adotado do conector tipo *stud*, ensaiado como parâmetro de referência, foi de 19mm. Desta forma, o volume de aço para o conector V-3,75mm é de 85,35cm³. Os conectores do tipo *stud* e V-2,65mm apresentaram volume de aço muito próximos, sendo 61,97 e 61,83cm³, respectivamente. Vale ressaltar que o volume de aço do conector do tipo *stud* é equivalente a dois espécimes, como pode ser observado na Figura 16 (BEZERRA et al., 2018a).

Figura 16 - Conector de cisalhamento do tipo V



Fonte: Bezerra et al. (2018a).

Os autores ensaiaram nove conectores, três para os conectores do tipo *stud*, três para o conector tipo V-2,65mm e mais três para o tipo V-3,75mm. O conector *stud* apresentou comportamento muito dúctil em relação ao conector do tipo V-2,65mm. No

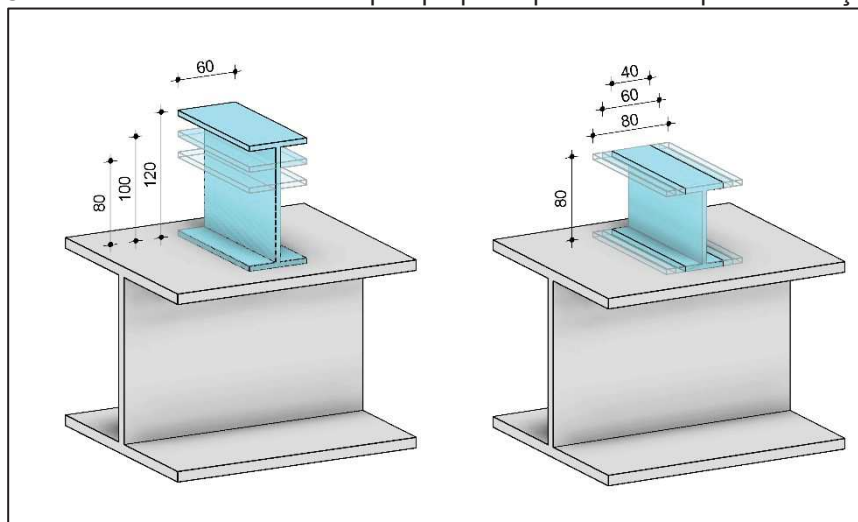
entanto, os conectores apresentaram uma resistência de carga final semelhante de 82t para o V-2,65mm e 88t para o *stud*. O conector V-3,75mm atingiu uma carga de 121t, apresentando um comportamento dúctil semelhante ao *stud*.

Os autores constataram ainda que se comparado com o *stud*, o conector V fornece menores concentrações de tensões no perfil e na laje, isso devido a maior superfície de contato, sendo as forças distribuídas de forma mais uniforme. A melhor distribuição das tensões beneficia o conector, tendo em vista que as abas podem ter espessuras menores. A concentração de tensão no conector induz uma deformação maior para os conectores *stud*, que por sua vez provoca um deslocamento maior entre o conector e o concreto.

2.2.4.4 Conector I

O conector em formato de perfil I (Figura 17) foi estudado por Titoum et al. (2016). O programa experimental realizou 24 ensaios de *push out* que foram agrupados em quatro séries, sendo que cada série possuía três pares de conectores. Cada uma das quatro séries variou características importantes no ensaio. Os do grupo A variaram a altura utilizada nos conectores: 80, 100 e 120mm. O grupo B variou a largura do conector: 40, 60 e 80mm. O grupo C, por sua vez, realizou a variação de acordo com a resistência característica do concreto: 20, 25 e 30MPa. Por último, a quantidade de barra de aço utilizada nos ensaios também foi variada: quatro, seis e oito bitolas de 8mm.

Figura 17 - Conector de cisalhamento do tipo I proposto pelos autores para realização do estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado obtido para a maioria dos testes apresentou deslizamento característico maior que 6mm, desta forma, o conector de cisalhamento pode ser considerado dúctil, de acordo com a Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004). No que diz respeito à separação das lajes de concreto e da viga metálica (*uplift*) os autores constaram ser mínimos e, portanto, de pouca influência sobre o comportamento dos conectores de cisalhamento em forma de I.

Se comparados os resultados dos ensaios nos quatro grupos, percebe-se que a maior e a menor resistência ao cisalhamento observada estão no grupo B, onde variou-se a largura. O conector que apresentou a maior resistência entre todos os ensaios foi o que possuía maior largura (80mm) e o conector que apresentou menor desempenho foi o que possuía menor largura (40mm). Este fenômeno está ligado à área de seção transversal que resiste aos esforços de cisalhamento, sendo que, como pôde ser percebido, quanto maior a área, maior a resistência ao cisalhamento (TITOUIM et al., 2016).

2.2.4.5 Conector rosqueável

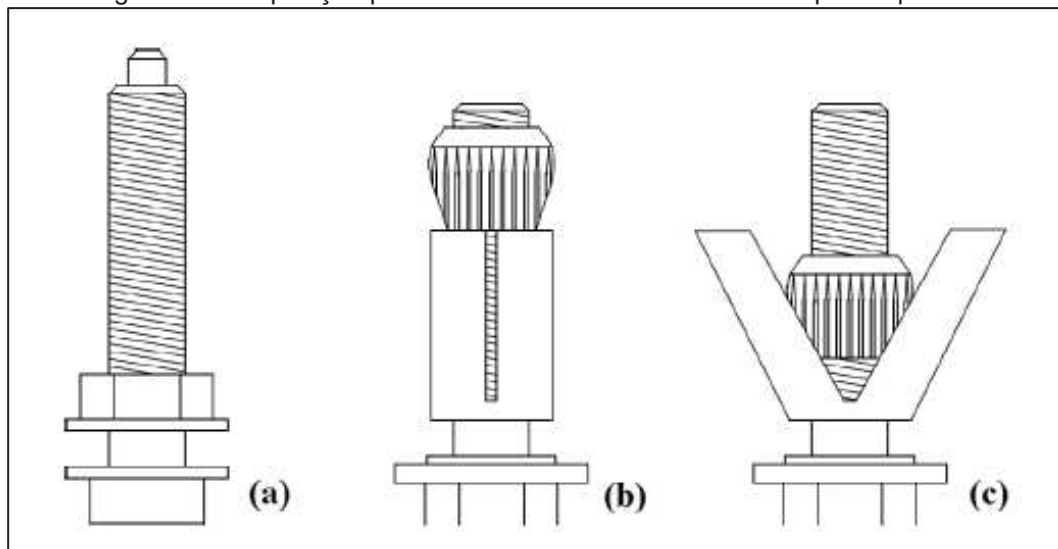
Em contraponto com conectores de cisalhamento que são utilizados na grande maioria de forma soldada, Henderson et al. (2017) e Henderson et al. (2015) estudaram uma forma de fixação rosqueada. O principal motivo, segundo os autores, para realização do estudo está na dificuldade do processo de fixação do conector soldado e também na preocupação com recursos finitos e caros da construção civil, tendo em vista que os parafusos rosqueados podem ser retirados e reutilizados em novas construções, caso a antiga seja de alguma forma desmanchada ou destruída.

A Figura 18 demonstra as proposições dos conectores de cisalhamento rosqueado. Foram propostos dois tipos de conectores. O primeiro conector proposto (BB1) não possuía confinamento e era apenas rosqueado à viga metálica (Figura 18A). Já o segundo conector (BB2) possuía um sistema de confinamento e pode ser observado de forma fechada na Figura 18B e de forma aberta na Figura 18C.

Os autores realizaram um estudo experimental com os conectores propostos e também utilizaram um conector padrão soldado *stud* (SS) como modelo de comparação. Realizou-se então ensaio de *push out* para verificar a resistência e rigidez dos conectores. O modo de falha do conector SS e BB1 foi por cisalhamento

na interface aço-concreto. Pôde-se observar também que SS não demonstrou grandes danos ao concreto, ao contrário de BB1 que causou danos ao concreto na forma de fissuras. Já BB2 por possuir uma geometria complexa e maior intrusão na seção de concreto, não apresentou corte na interface aço-concreto. O conector que apresentou maior rigidez foi o BB2, com cerca de 12% maior que o SS e 10% maior que BB1.

Figura 18 - Proposição para o conector de cisalhamento do tipo rosqueável



Fonte: Henderson et al. (2015).

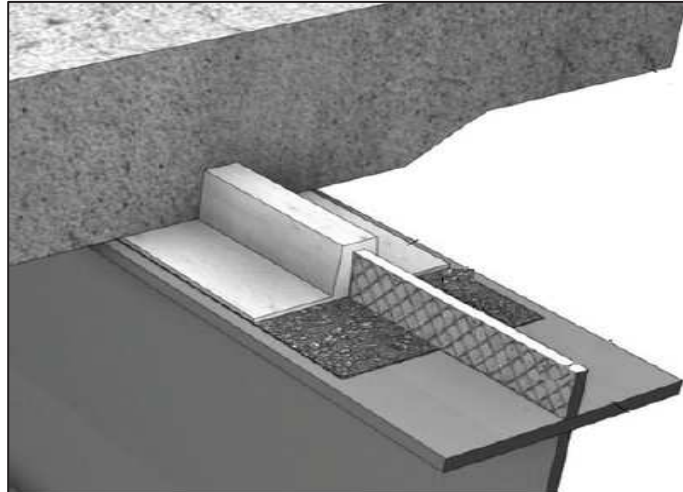
2.2.4.6 Conexão por aderência

A conexão por aderência está diretamente ligada com a fricção entre várias interfaces. Estas ligações podem ser utilizadas para ligar toda a profundidade da laje de concreto pré-moldada com vigas de aço. Thomann e Lebet (2008) relatam que a principal aplicação desta técnica é em pontes mistas, isto porque o uso desta ligação reduz o tempo de montagem consideravelmente e, portanto, pode ser utilizado para substituir tabuleiros de pontes existentes, onde a duração dos trabalhos no local tem influência significativa sobre os custos e perturbações de trânsito.

Um exemplo de conexão por aderência pode ser observado na Figura 19, onde existe uma placa de aço soldada longitudinalmente sobre a viga de aço. O reboco superior é então revestido com uma resina epóxi e areia grossa. Para tornar a superfície do concreto rugosa utiliza-se um dispositivo mecânico que realiza o hidrojateamento de areia.

Para comprovar a resistência das conexões por aderência, os autores realizaram ensaios de *push out* em três tipos de conectores. Um por aderência e outros dois normais, *stud* e *perfobond*. Em nenhum dos ensaios se utilizou reforço com barras de aço na transversal. Os conectores *studs* possuíam diâmetro de 22mm, já o *perfobond* possuía 14 furos de 50mm de diâmetro cada.

Figura 19 - Modo de conexão por aderência



Fonte: Thomann e Lebet (2008).

Percebeu-se que as conexões por aderência possuem elevada resistência ao cisalhamento se comparado com os *studs* e *perfobond*. No caso dos conectores de *perfobond* a resistência menor se explicou pela falta de reforço com barras de aço entre os furos, o que diminuiu consideravelmente a capacidade.

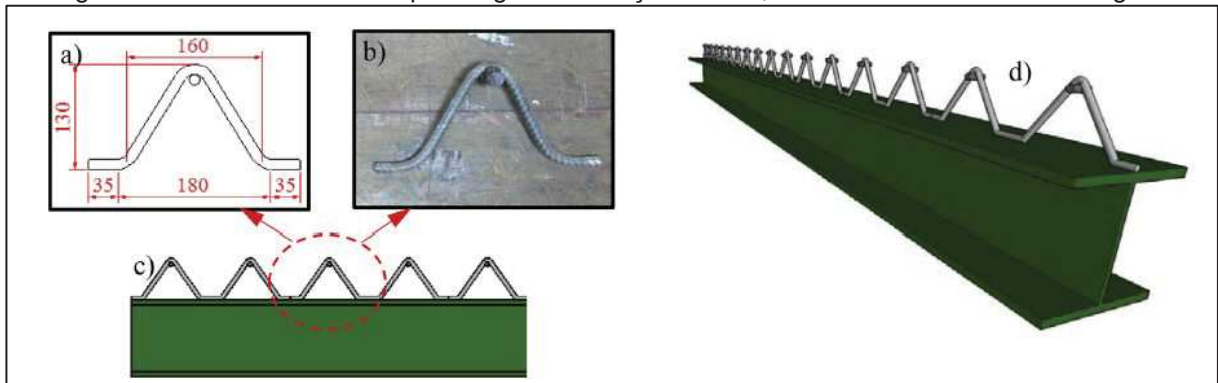
2.2.4.7 Conector de cisalhamento com barras de aço CA-50A

A proposição de um novo conector de cisalhamento com barras de aço CA-50A surgiu para proporcionar um baixo custo de produção aliado à uma facilidade de execução, sem perder a capacidade e eficiência quanto à resistência e aos deslizamentos relativos entre o perfil metálico e a laje de concreto. O conector proposto é formado por um vergalhão de aço em formato triangular, como observado na Figura 20 (BEZERRA et al., 2018b).

O estudo realizado pelos autores foi composto por duas partes. A primeira parte foi realizada por meio de modelagem matemática fazendo-se uso do método dos elementos finitos, cujo a finalidade era justificar a escolha dos diâmetros dos

conectores a serem ensaiados. A segunda parte, por sua vez, foi realizada de forma experimental. Foram realizados ensaios de *push out* no conector proposto, e para servir como parâmetro de referência utilizou-se o conector padronizado pela norma: *stud*, com diâmetro de 19mm.

Figura 20 - Conector formado por vergalhão de aço CA-50A, dobrado em formato de triângulo



Fonte: Bezerra et al. (2018b).

Os resultados encontrados pelos autores no ensaio de *push out* mostram que o deslizamento vertical do conector proposto é muito análogo e próximo ao do *stud*. Outra consideração importante relatada no estudo diz respeito à forma de transferência de esforço para a mesa da viga metálica. Foi observado que quanto maior o diâmetro do conector treliçado, maior a transferência de esforço para a mesa, menor o esforço absorvido pelo conector e menor o deslocamento vertical da laje. Desta forma, para diâmetros menores existe uma maior concentração de esforços no conector e menor concentração na mesa do perfil metálico.

2.2.4.8 Comportamento dos conectores estudados

Por meio das pesquisas consultadas no tópico sobre novos conectores de cisalhamento estudados na literatura, pôde-se perceber alguns fatores importantes que influenciam na interação do sistema aço-concreto, dentre estes a geometria utilizada na construção do conector, a área de seção transversal e a própria forma de fixação entre o perfil metálico e o elemento proposto.

Quando os conectores são submetidos a ensaios de flexão em viga mista, pode-se perceber se o sistema gerou deslocamentos transversais e verticais excessivos ou não (*slip* e *uplift* respectivamente) e os resultados é possível classificar

e analisar a interação entre a laje de concreto e a viga metálica, sendo total quando as separações verticais e horizontais são baixas/inexistentes ou parciais quando os deslocamentos se mostram maiores.

Sobre os conectores construídos utilizando-se chapas metálicas, os estudos demonstraram que todos proporcionaram resistência ao cisalhamento longitudinal e preveniram ainda a separação vertical e transversal entre o perfil metálico e os componentes de concreto (*uplift* e *slip*).

Outro ponto importante observado nos conectores tipo chapa, tem ligação direta com a capacidade de retenção de carga após o pico, o que não acontece com o conector *stud bolt*, normatizado pela NBR 8800, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). Como o conector *stud* possui uma área pequena de contato com a viga, a concentração de tensão nesse ponto é muito maior que a observada em conectores do tipo chapa, que possuem maior área de contato com a viga metálica, dessa forma, a tensão no concreto diminui e a resistência do sistema aumenta consideravelmente, chegando a ser de um para quatro como encontrado nos estudos de Veríssimo et al. (2007).

Os conectores que apresentam inclinações em relação as abas/flanges, garantiram maior desempenho contra a força de separação vertical, isso porque os elementos dobrados funcionavam como “garras”, garantindo maior adesão do conector de cisalhamento com a laje de concreto.

2.3 INSTRUMENTAÇÃO DA LITERATURA

A maioria das pesquisas encontradas para servir de base para esta pesquisa, realizavam estudos numéricos e de modelagem com elementos finitos para entender o comportamento da estrutura, tendo em vista o alto valor financeiro que cada ensaio realizado de forma experimental possui, como por exemplo: materiais, instrumentação, mão de obra e o próprio tempo, isso tudo aliado à complexidade de se trabalhar com elementos em escala real.

Desta forma, realizou-se uma pesquisa bibliográfica onde 22 trabalhos foram identificados para servir de base para a instrumentação proposta. Os trabalhos selecionados apresentavam de forma mais objetiva a instrumentação (na grande maioria utilizando-se esquemas de apresentação).

2.3.1 Instrumentação em vigas mistas

Para uma melhor percepção sobre a instrumentação que será utilizada foi realizada uma pesquisa bibliográfica de estudos que tinham como foco a utilização de vigas mistas de aço-concreto, porém não necessariamente tendo como objeto de estudo os conectores de cisalhamento. A Tabela 1 apresenta os autores consultados e também os locais instrumentados por cada, fazendo-se uso de *linear variable differential transformers* (LVDT's) e *strain gauges* (SG's).

Tabela 1 - Autores pesquisados para propor a instrumentação utilizada no ensaio de viga mista de aço-concreto, bem como localização de tais instrumentações

VIGAS MISTAS														
AUTORES	Choi et al. (2018)	Tran, Do e Nguyen (2018)	Wang et al. (2018)	Liu et al. (2017)	El-Sayed et al. (2016)	Firno et al. (2016)	Le et al. (2016)	Yatim e Shamugam (2016)	Patirana et al. (2015)	Alves et al. (2014)	Chaves (2009)	David (2007)	Jurkiewicz e Hottier (2005)	Frequência de utilização
INSTRUMENTAÇÃO	LVDT													
Centro do vão (Flecha)														100%
Sob a aplicação da carga			**					**					**	69%
Terço médio da viga														23%
Distribuída sob o perfil metálico*														54%
<i>Uplift</i> (separação vertical)														92%
Escorregamento (<i>slip</i>)														77%
INSTRUMENTAÇÃO	STRAIN GAUGE													
Laje de concreto (superior)														62%
Laje de concreto (Inferior)														62%
Laje de concreto (lateral)														31%
Viga metálica (Superior)														62%
Viga metálica (Inferior)														77%
Viga metálica (alma)														54%
Conector de cisalhamento														23%
* Distribuído sem padrão e conforme necessidade do estudo							**Aplicação da carga em um ponto apenas (centralizado)							

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que todos os autores instrumentaram o meio do vão para que fosse possível observar o comportamento da flecha máxima atingida em cada um dos ensaios. Em contrapartida, a instrumentação realizada sobre as aplicações de carga, terço médio das vigas e distribuídas sobre o perfil metálico conforme necessidade do estudo servia para avaliar o comportamento global da estrutura como um todo. A maioria dos autores constataram que as vigas mistas ensaiadas possuem comportamento homogêneo nos últimos três pontos relatados acima e que a variação ocorria dentro do que era esperado.

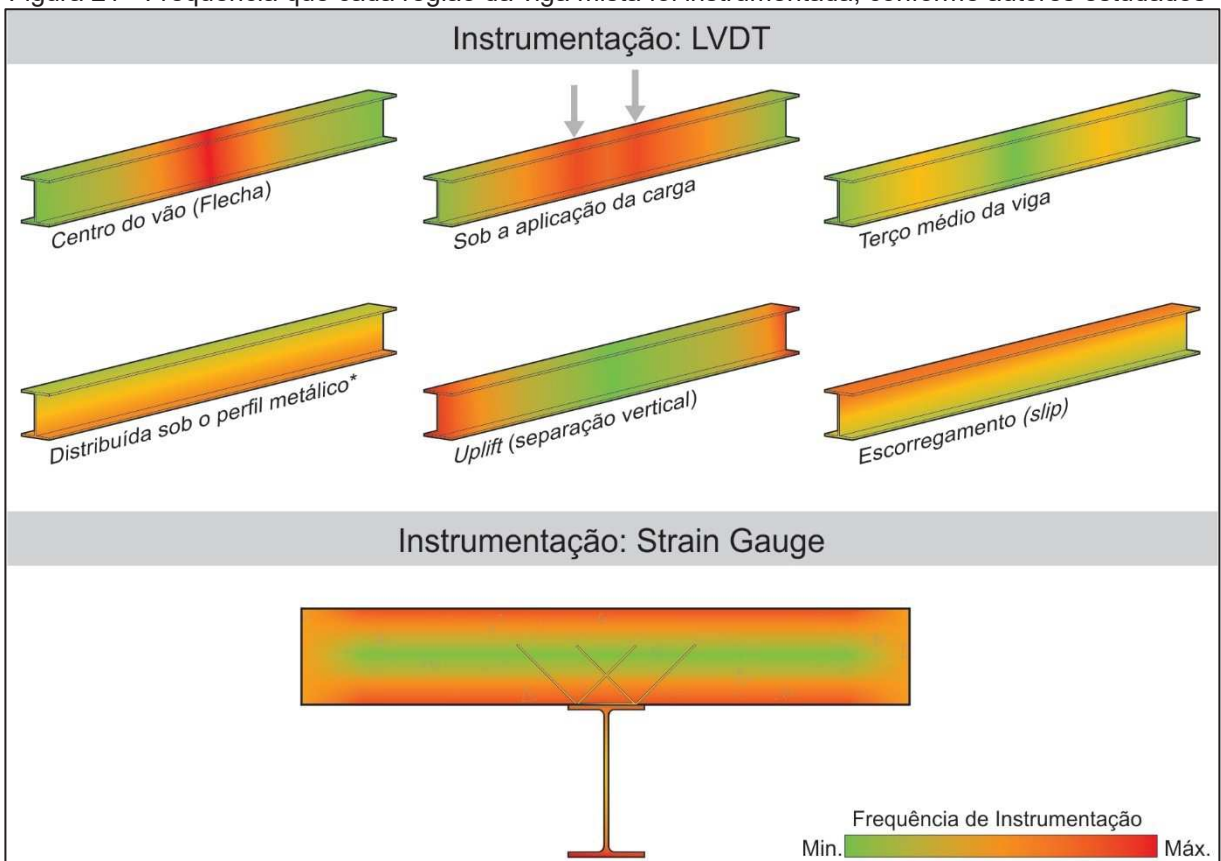
Por outro lado, o *uplift* (deslocamento/separação vertical entre o perfil metálico e a laje de concreto) e o escorregamento *slip* (deslocamento horizontal entre o perfil metálico e a laje de concreto) foram identificados e instrumentados pela maioria dos autores, isso porque é por meio destes dados que pode-se confirmar se a estrutura

mista de aço-concreto teve ou não interação completa com a utilização do conector de cisalhamento.

A utilização de SG's ocorreu de forma externa: laje de concreto (superior, inferior e lateral), viga metálica (superior, inferior e alma), e de forma interna no conector de cisalhamento. Percebe-se que poucos estudos realizaram a instrumentação no conector de cisalhamento, o principal motivo do baixo número tem relação direta com o objeto de estudo de cada autor, sendo que a grande maioria já conhecia as características físicas e mecânicas do elemento e estudavam outras particularidades do sistema misto.

A instrumentação com SG's na laje e na viga metálica foi proposta pelos autores para que fosse possível conhecer o comportamento de ambos os materiais quando submetidos às cargas de ensaio, e mais especificamente, sobre como os materiais reagiriam em tensões elevadas, permitindo-se então a visualização de microdeformações na estrutura. A Figura 21 demonstra a frequência com a qual cada região da viga foi instrumentada, levando-se em consideração os autores consultados na Tabela 1.

Figura 21 - Frequência que cada região da viga mista foi instrumentada, conforme autores estudados



Fonte: Elaborado pelo autor

2.3.2 Instrumentação em ensaios de cisalhamento direto (*push out*)

Com o intuito de elaborar uma melhor exposição sobre a instrumentação utilizada, uma pesquisa bibliográfica se fez necessária com foco no ensaio de cisalhamento direto para conectores de cisalhamento (*push out*). A Tabela 2 apresenta os autores consultados e também os locais instrumentados por cada um deles, fazendo-se uso de LVDT's e SG's.

Tabela 2 - Autores pesquisados para propor a instrumentação utilizada no ensaio de *push out*

PUSH OUT										
AUTORES	Bezerra et al. (2018)	Huo et al. (2018)	Ding et al. (2017)	Titoum et al. (2016)	Václavíková (2016)	Sales et al. (2015)	Patrirana et al. (2015)	Chaves (2009)	David (2007)	Frequência de utilização
INSTRUMENTAÇÃO	LVDT									
Deslocamento Vertical (um lado)										22%
Deslocamento Vertical (dois lados)				*						78%
Separação Horizontal (um lado)										22%
Separação Horizontal (dois lados)										67%
INSTRUMENTAÇÃO	STRAIN GAUGE									
Instrumentação do conector										78%
Instrumentação da armadura transversal										11%

* Relógio analógico

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o ensaio de *push out* é normatizado pelo Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004), a instrumentação externa já é pré-definida, sendo obrigatório a verificação do deslocamento vertical e da separação horizontal em pelo menos um dos lados do experimento. Como percebe-se na Tabela 2, quase 100% dos estudos realizaram instrumentações nesses pontos.

Sobre a instrumentação interna, realizada pelos SG's, a grande maioria dos estudos optou pela instrumentação dos conectores de cisalhamento. Os conectores eram instrumentados sempre o mais próximo possível da base, pois a concentração de tensões cisalhantes neste ponto era maior, ou como constatou Václavíková (2016), em seus estudos numéricos, em locais onde exista uma perda de seção do conector, sendo que as tensões nesses pontos costumam ser mais elevadas devido a menor área e maior sollicitação.

Apenas um dos estudos consultados instrumentou a armadura transversal presente no ensaio de *push out*. Os autores justificaram tal escolha afirmando haver

necessidade de conhecer o comportamento da estrutura como um todo e as deformações que aconteceriam especificamente nas armaduras transversais.

2.3.3 Extensômetros elétricos

A determinação de deformação e força têm inúmeras e importantes aplicações práticas nas engenharias, principalmente em ensaios voltados à resistência dos materiais onde pretende-se analisar as tensões e deformações em estruturas por meio da utilização de sensores eletrônicos e mecânicos (GUADAGNINI; ROCHA; BARLETTE, 2011).

Os extensômetros de resistência elétrica se baseiam no fato de que ao sofrerem deformação os materiais mudam a resistência elétrica (SANTIAGO, 2010). O funcionamento desse tipo de extensômetro foi desenvolvido em 1856 por Lord Kelvin ao observar que fios de cobre e de ferro aumentavam a resistência elétrica à medida que a tensão causada pela tração imposta aos fios também aumentava (DALLY; RILEY, 1987).

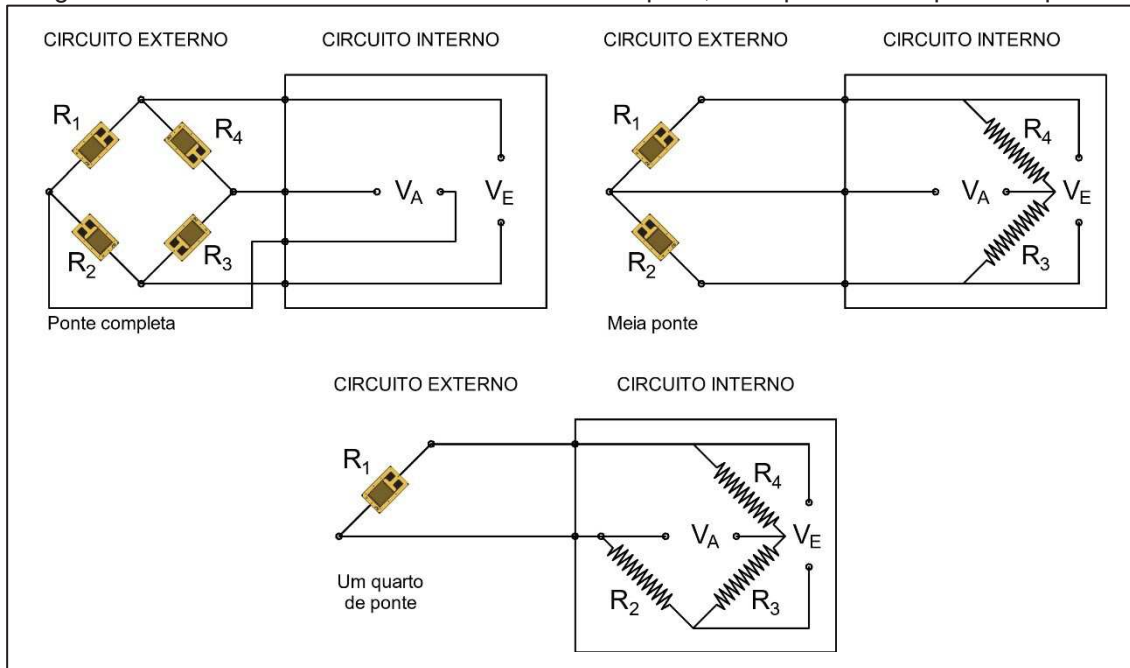
2.3.3.1 Circuito de medição

A ponte de Wheatstone está entre os circuitos mais utilizados para medição de variação de resistência elétrica, capaz de converter tal variação em voltagem. Porém, apesar de serem largamente utilizados, esses circuitos podem apresentar erros de linearidade que em algumas situações (dependendo do grau de precisão desejado) deve ser corrigido manualmente ou eletronicamente (COELHO; MORILLA, 2014).

Existem diferentes versões da ponte de Wheatstone, dentre elas pode-se citar: o circuito de ponte completa, utilizada para medir a deformação em três direções; o circuito de meia ponte, utilizado para medir deformações em duas direções; e o circuito de um quarto de ponte, utilizado para mensurar as deformações que acontecem em uma única direção (FREDDI; OLMI; CRISTOFOLINI, 2015).

A Figura 22 ilustra as respectivas pontes, sendo que no circuito externo se encontram os extensômetro e no interno as resistências que não sofrem deformações e que são necessárias para completar a ponte. Na Figura 22 observa-se que VE é uma fonte de potência com voltagem conhecida e VA uma diferença de potencial.

Figura 22 - Pontes de Wheatstone com circuito completo, meia ponte e um quarto de ponte



Fonte: Adaptado de Freddi, Olmi e Cristofolini (2015).

2.3.3.2 Cuidados para instrumentação

Diversos cuidados devem ser tomados na execução da instrumentação. Dentre as mais importantes os autores Rocha e Guadagnini (2014) citam a escolha e preparação da cola, bem como o processo de colagem dos extensômetros. A cola mais aconselhada para tais finalidades deve ter como base a resina epóxi, garantindo real aderência entre o elemento em estudo e o extensômetro. Sobre o processo de fixação, o mais aconselhado é que o mesmo ocorra sobre uma superfície plana e livre de partículas de sujeira, álcalis depositados e oleosidades que, eventualmente, existam na estrutura.

Depois de colado, os autores ainda relatam a importância da proteção do extensômetro a fim de não sofrer ataques de intempéries (como umidade), agentes químicos e choques mecânicos. A proteção pode ser realizada com cera de abelha filtrada, borrachas de silicones e resinas de poliéster.

3 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

3.1 ASPECTOS GERAIS

A pesquisa é classificada quanto à natureza aplicada, possuindo abordagem ao problema quantitativo. Quanto ao enfoque, consiste em uma pesquisa exploratória com procedimentos técnicos baseados em estudo de caso.

Ao se avaliar uma nova proposta tecnológica é muito importante uma análise experimental criteriosa, pois esta trará informações importantes para que ocorra a aceitação do elemento proposto. A análise experimental será constituída de duas etapas: ensaio de cisalhamento direto (*push out*) no conector de cisalhamento proposto e ensaio de flexão simples em viga mista biapoiada (engate parcial), onde pretende-se analisar o comportamento estrutural do sistema aço-concreto.

O ensaio de cisalhamento direto (*push out*) permite avaliar a ductilidade e a resistência ao cisalhamento do conector em questão. O estudo foi realizado na cidade de Chapecó-SC, no laboratório de tecnologia do concreto e resistência dos materiais da Universidade Comunitária da Região de Chapecó - Unochapecó, utilizando-se máquina universal hidráulica com aplicação de carregamento de até 100 toneladas.

O ensaio de flexão simples em viga mista de aço-concreto permite avaliar a resistência, a rigidez e modos de falha, assim como o comportamento estrutural da mesma. O ensaio foi realizado no mesmo equipamento utilizados para o ensaio de cisalhamento direto (*push out*).

Outro aspecto importante do estudo foi propor uma instrumentação efetiva e que permitisse a coleta de dados de pontos importantes dos elementos ensaiados, isso tudo levando-se em consideração a quantidade de resultados que poderia ser coletado por ensaio, uma vez que o aquisitor de dados utilizado nesta pesquisa possuía oito entradas analógicas e uma delas é destinada a medir a força aplicada pela célula de carga, sendo assim, restaram sete respostas possíveis de serem obtidas em cada ensaio realizado.

3.2 CONECTOR DE CISALHAMENTO

3.2.1 Produção do conector de cisalhamento

O conector de cisalhamento proposto possui o formato de um perfil metálico tipo “U”, modular, sendo que suas abas são dobradas e inclinadas a um ângulo próximo ao de 45°, pois as trajetórias das tensões principais de cisalhamento apresentam-se inclinadas aproximadamente à 45° ou, em relação ao eixo oposto, 135°.

Para a produção dos conectores de cisalhamento foram utilizadas chapas de aço EB-276-I/II da classe CF-24 com espessura de 2mm, classificada pela NBR 6649, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), como chapa fina laminada a frio, para uso em estruturas. A tensão de escoamento (f_y) do material é igual a 240MPa, sendo a tensão última (f_u) de 380MPa e módulo de elasticidade (E) de 205GPa.

3.2.1.1 Corte das chapas metálicas

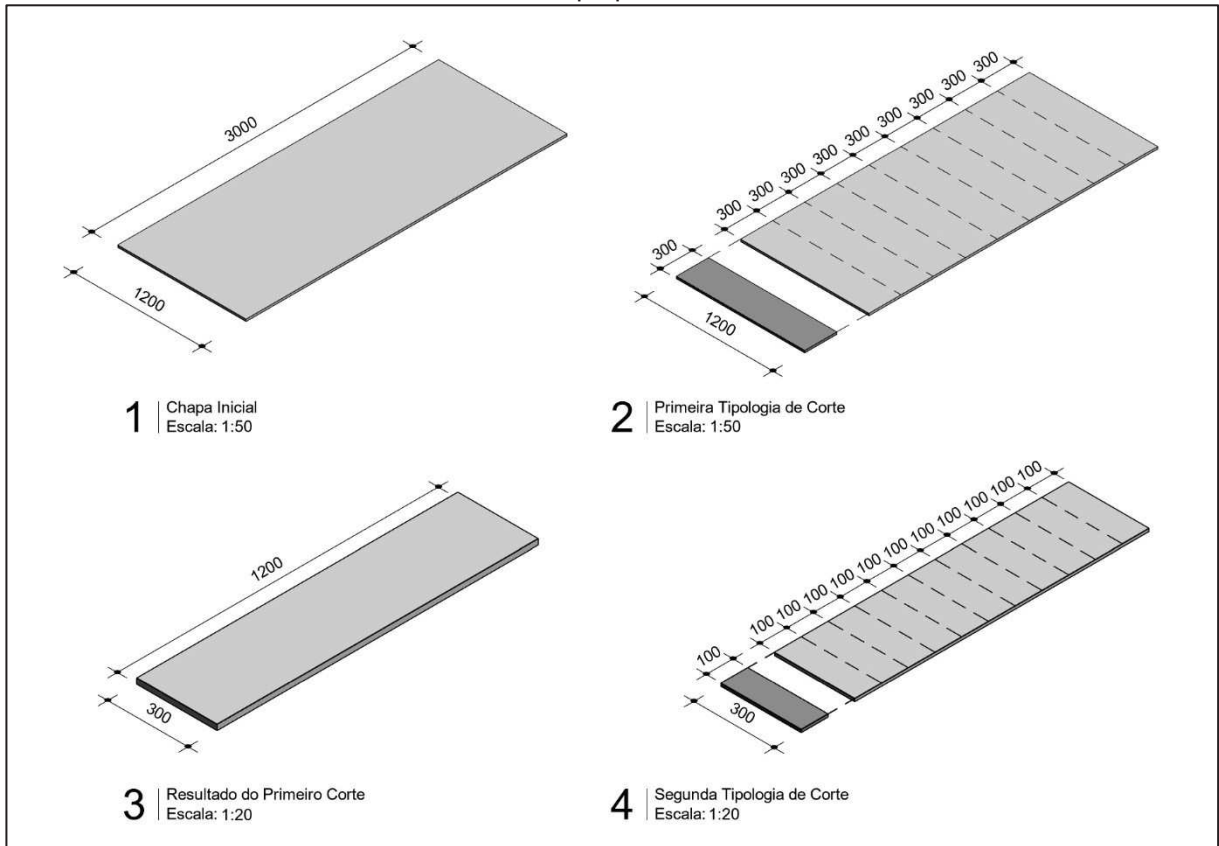
As chapas eram compradas planas com as dimensões de 3000x1200mm (Figura 23, detalhe 1), desta forma, precisavam ser cortadas e dobradas nas especificações do conector de cisalhamento proposto.

Para o corte das chapas utilizou-se uma guilhotina hidráulica da marca SORG, modelo SGH 810/60 que possui largura de corte de 6050mm e com capacidade para cortar chapas com até 10mm de espessura. O processo de corte seguiu os passos especificados na Figura 23.

Primeiramente com a ajuda de uma empilhadeira as chapas eram retiradas do estoque e levadas até a máquina de corte. Posteriormente, o operador informava à máquina a espessura da chapa e as dimensões dos cortes a serem feitos. Depois de programar a guilhotina, a chapa era colocada no vão especificado para o corte e com o auxílio de um pedal hidráulico a máquina era acionada, realizando o corte. A chapa era cortada em 10 peças de 300x1200mm (Figura 23, detalhe 2).

Posteriormente as chapas de 300x1200mm (Figura 23, detalhe 3), foram colocadas na máquina e cortadas em 12 peças de 300x100mm (Figura 23, detalhe 4). Desta forma, cada chapa de 3000x1200mm poderia produzir um total de 120 conectores de cisalhamento, sem nenhum desperdício de material.

Figura 23 - Processo de corte das chapas de aço-carbono para produção do conector de cisalhamento proposto no estudo



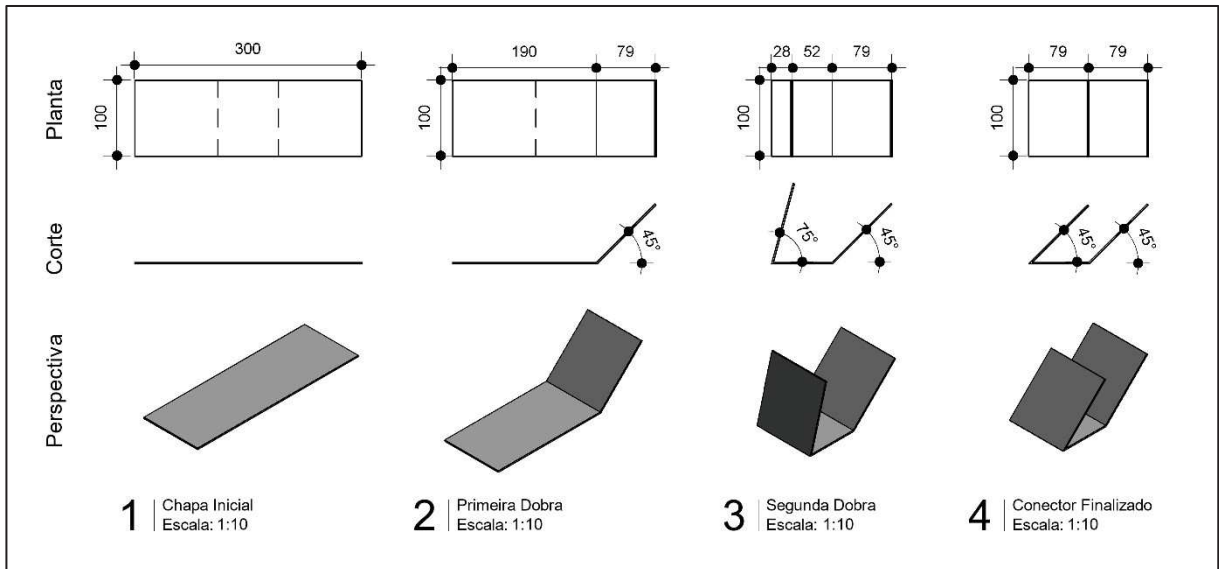
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.2 Dobra dos conectores de cisalhamento

Para a dobra das chapas utilizou-se uma prensa dobradeira da marca SORG, modelo DSH 300/60 que possui largura de dobra de 6050mm e aplica uma força de até 350t. O processo de dobra seguiu os passos especificados na Figura 24.

Depois de cortadas, as peças eram levadas até a máquina de dobra. Primeiramente o operador informava para a dobradeira a espessura da chapa e o ângulo que as mesmas seriam dobradas, com essas duas informações a própria máquina calculava a força que deveria ser aplicada. Cada chapa seria dobrada duas vezes: primeiramente a 45° e depois a 75°. A máquina de dobra não tinha curso suficiente para dobrar as peças duas vezes nas angulações necessárias, desta forma, o que faltava de 75° para 45° foi realizado manualmente na metalúrgica.

Figura 24 - Processo de dobra das chapas de aço-carbono para produção do conector de cisalhamento proposto no estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

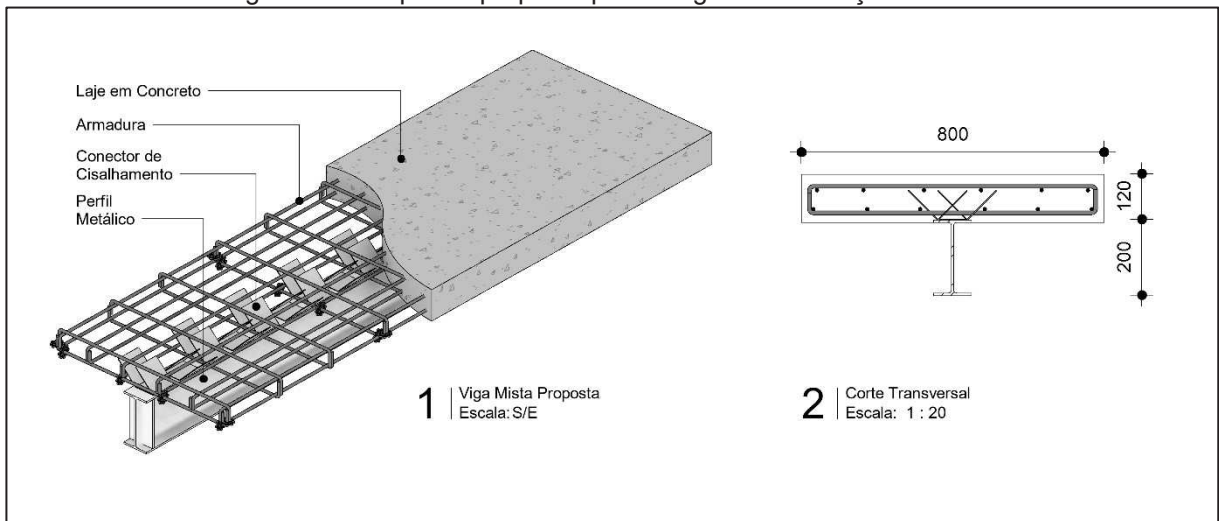
Com o auxílio de um paquímetro, a chapa de 300x100mm foi medida e marcada. Foi necessário medir e marcar apenas a primeira chapa, sendo que depois de programada a máquina salvava na memória as informações. Inicialmente o operador encosta a chapa normal (Figura 24, detalhe 1) no encosto da máquina, aciona o pedal hidráulico e realiza a primeira dobra a 45° (Figura 24, detalhe 2). Retira então a peça dobrada e recoloca a mesma com a parte ainda não dobrada no encosto e realiza a segunda dobra a 75° (Figura 24, detalhe 3). O restante da angulação era corrigido na metalúrgica.

O conector tem seção transversal com as seguintes dimensões: espessura de 2mm, altura de 79mm, e largura da base de 80mm. A espessura de 2mm adotada é função da espessura mínima para peças estruturais, sem necessidade de proteção contra a corrosão, indicado pela NBR 8800, da associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). A altura de 79mm foi adotada para que o conector fique totalmente envolvido pela capa de concreto que possuirá dimensão de 120mm, e também em função da angulação das peças. A largura de 80mm foi adotada para que a base do conector possa ser soldada sobre a mesa do perfil metálico que possui 100mm de largura, desta forma sobrando 10mm de cada lado.

3.3 VIGA MISTA DE AÇO-CONCRETO

O sistema proposto de viga mista de aço-concreto permite avaliar a resistência, a rigidez e modos de falha, assim como o comportamento estrutural da mesma. Para o estudo de flexão foi construída uma viga mista conforme pré-especificado pela Figura 25. Para isso foi preciso projetar e propor: caixarias, ferragens, disposição dos conectores de cisalhamento sobre a viga metálica e a instrumentação que seria utilizada para aquisição de dados.

Figura 25 - Esquema proposto para a viga mista de aço-concreto



Fonte: Elaborado pelo autor.

A largura efetiva da laje proposta foi embasada pelo efeito de *shear lag*, que está diretamente ligado com a distribuição não constante de tensões axiais ao longo da largura da laje, sendo que os valores máximos das tensões se encontram no centro do perfil metálico e decaem gradualmente na direção dos pontos mais afastados (SILVA; DIAS, 2018).

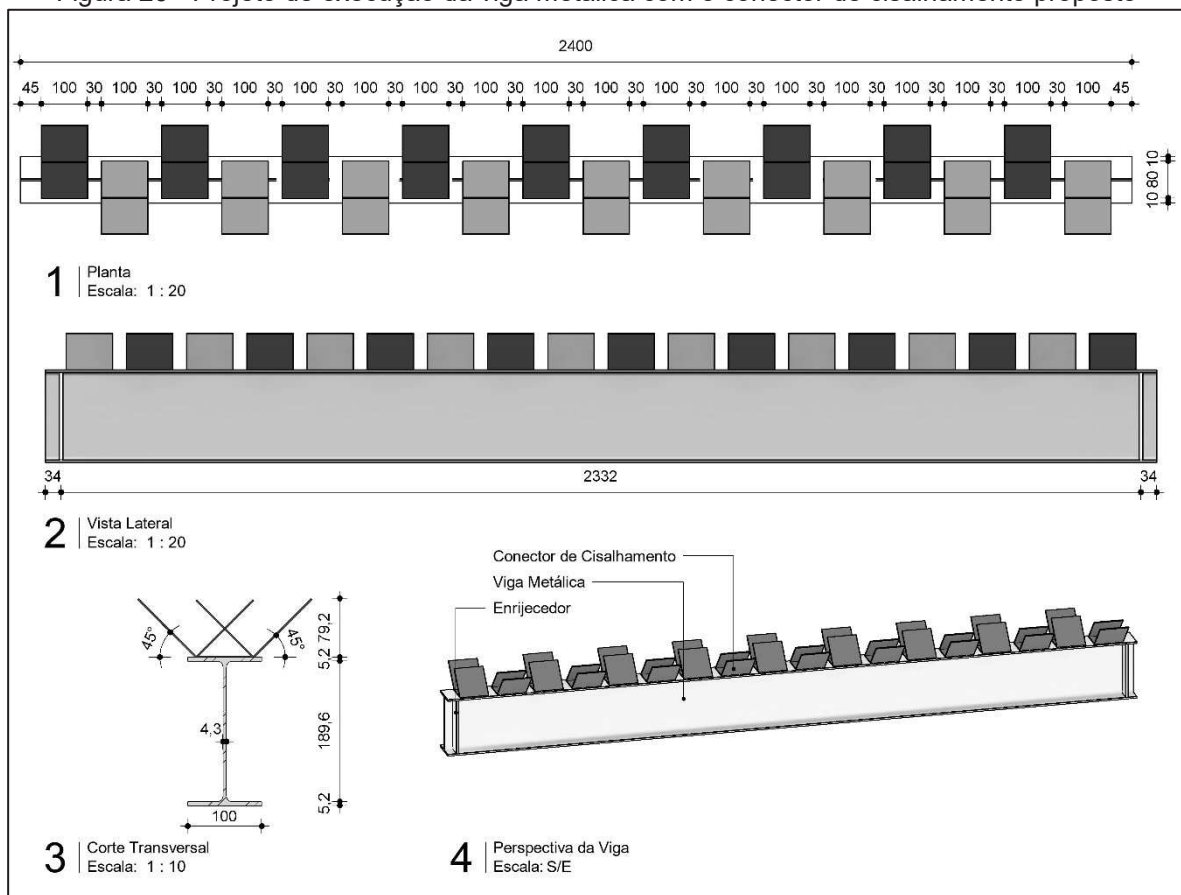
3.3.1 Produção da viga metálica

A viga metálica utilizada possuía seção transversal conforme Figura 26, detalhe 3. A viga é produzida com aço EB-583 da classe MR, classificado pela NBR 7007, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016), como aço para perfil laminado de uso estrutural. A tensão de escoamento (f_y) do material é igual a 250MPa, sendo a tensão última (f_u) de 400MPa, e módulo de elasticidade (E) de 205GPa.

As vigas metálicas são vendidas/comercializadas com comprimento padrão de 12000mm, desta forma, o primeiro passo foi realizar o corte da mesma, fixando a dimensão em 2400mm de comprimento. O corte era realizado em uma serra de fita horizontal da marca Franho, modelo FM400, com capacidade de corte transversal de até 200mm. Após finalizado o corte a mesma era levada até uma superfície plana para que os conectores de cisalhamento fossem fixados.

Como o perfil utilizado possuía certa esbelteza na alma, foram fixados quatro enrijecedores transversais para impedir possíveis flambagens laterais, sendo dois cada lado e próximos aos apoios, como apresentado na Figura 26, detalhe 2 e 4.

Figura 26 - Projeto de execução da viga metálica com o conector de cisalhamento proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que os conectores fossem fixados conforme as especificações da Figura 26, detalhe 1, foram utilizados dois gabaritos: um longitudinal e outro transversal. O gabarito horizontal constituía em uma barra chapa com 10mm de largura e 2400mm de comprimento. A mesma foi disposta sobre a mesa da viga no sentido longitudinal, de um dos lados e fixada com três pontos de solda no decorrer da estrutura. O gabarito

transversal era um pequeno paralelepípedo de 30mm de largura por 30mm de altura e 120mm de comprimento, que podia ser mudado de local conforme as soldas nos conectores fossem acontecendo.

O processo de fixação dos conectores iniciava marcando-se uma das extremidades da viga em 45mm, sendo o primeiro conector encostado no risco e também na barra chapa para ser fixado por dois pingos de solda. Após a fixação do primeiro conector, o segundo era fixado utilizando-se o gabarito longitudinal e transversal como referência espacial para, posteriormente, ser fixado com dois pingos de solda. O processo repetiu-se até a soldagem do 18º conector de cisalhamento sobre a viga.

Mesmo com a utilização dos gabaritos, a cada conector fixado realizava-se verificação de esquadro do mesmo, para prevenir possíveis falhas e desalinhamentos. Após todos os conectores estarem fixados em uma das laterais, a barra chapa era retirada com a utilização de uma lixadeira para desfazer os pingos de solda.

Em seguida, a viga foi virada e os conectores fixados utilizando-se solda do tipo MIG, continua em toda lateral. A solda foi realizada no sentido longitudinal da viga, fazendo-se a fixação de ambos os lados do conector (não sendo soldadas as laterais transversais do elemento). Foi aplicada solda primeiramente do lado que não havia sido ponteadado previamente, isso para impedir que o conector se deformasse com o calor do eletrodo. Ao término de um dos lados da viga, a mesma era virada e o local onde anteriormente havia sido realizado os pingos de solda, era fixado completamente.

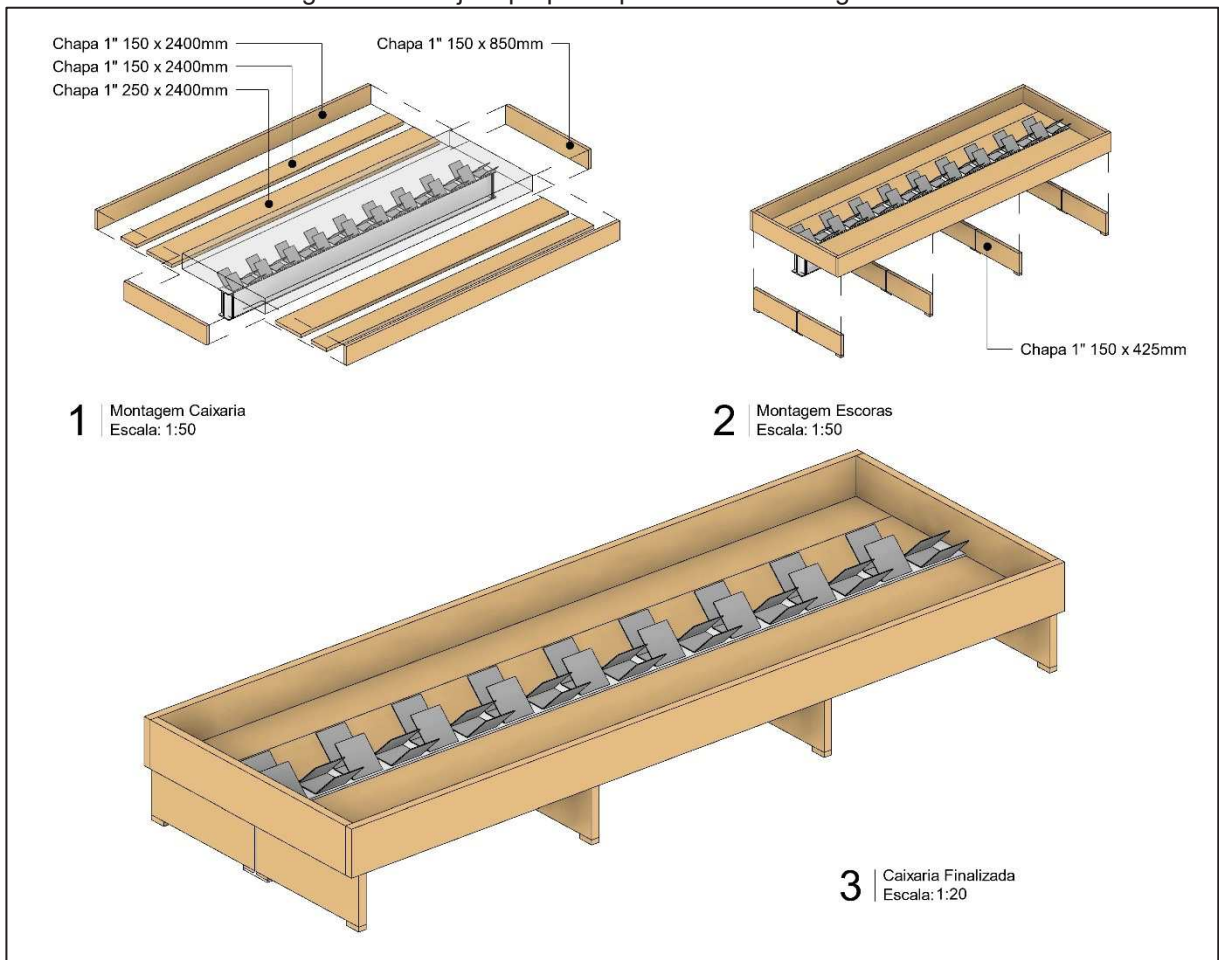
3.3.2 Caixaria da viga

Para a confecção da caixaria da viga foram utilizadas madeiras do tipo pinus, de primeira e sem nó, com espessura de uma polegada. Durante o processo foram utilizadas guias de 150 e 250mm de largura. A laje proposta sobre a viga tem espessura de 120mm, largura efetiva de 800mm e comprimento de 2400mm. O Projeto das caixarias pode ser visualizado na Figura 27.

No primeiro momento, as madeiras de 150mm e de 250mm foram medidas e com o auxílio de um esquadro foram marcadas. Utilizando-se uma circular da marca Bosch, modelo GKS 7, as madeiras foram cortadas a 2400mm. Foram produzidas quatro peças com as dimensões de 150x2400mm, duas para o fundo e duas para as

laterais longitudinais da laje e mais duas peças com as dimensões de 250x2400mm, ambas utilizadas para o fundo da laje. Por último foram cortadas as laterais transversais da laje, sendo as madeiras medidas, marcadas e depois cortadas, com dimensões de 150x850mm.

Figura 27 - Projeto proposto para caixaria da viga mista



Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois das peças cortadas, deu-se início ao processo de montagem das caixarias. Primeiramente, as escoras foram fixadas nas vigas. Sobre as escoras e encostado na viga foi colocada uma guia de 250x2400mm, as quais foram pregadas. Posteriormente, a guia de 150x2400mm era fixada e pregada. O processo ocorreu dos dois lados.

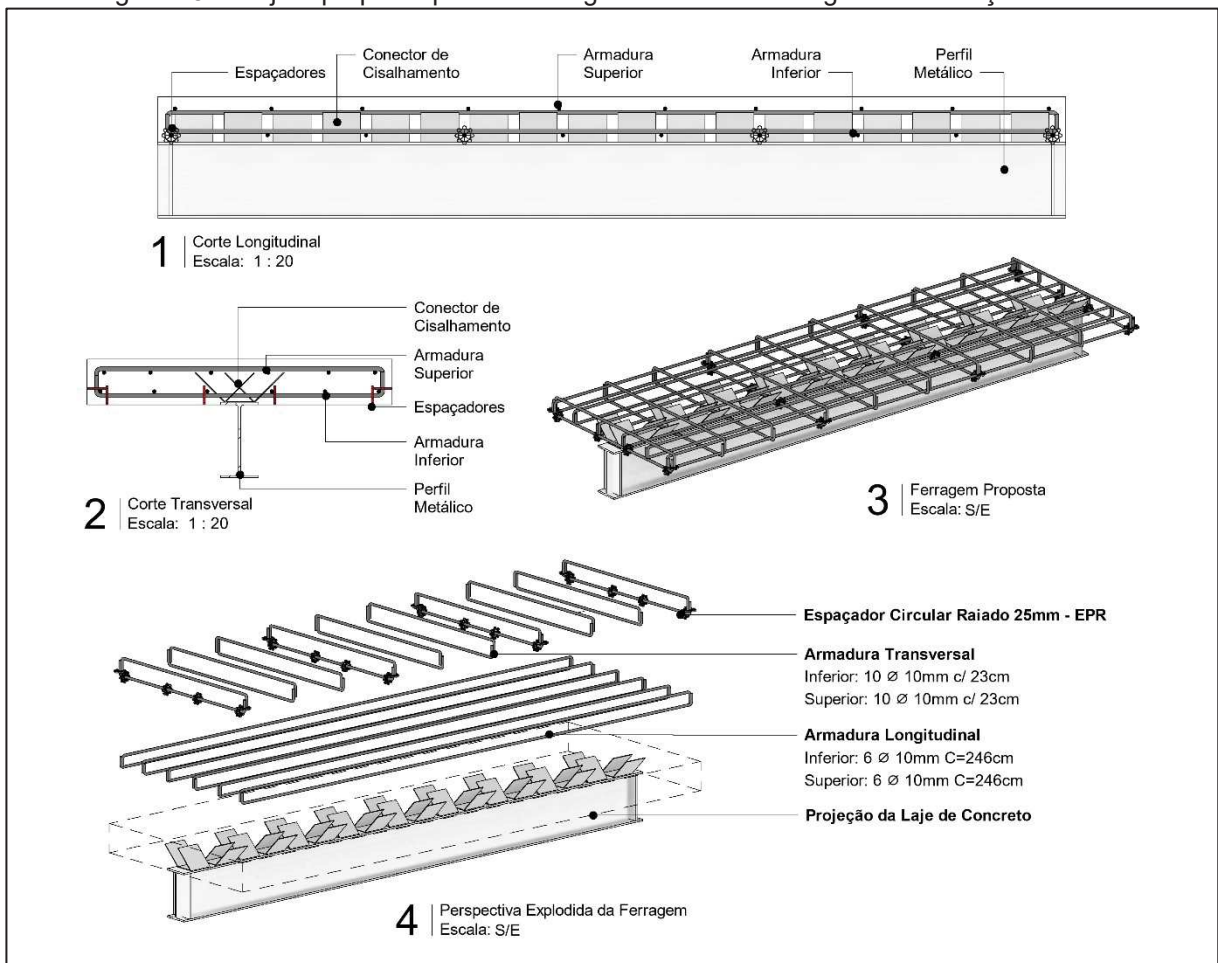
Com o fundo da laje já executado, as laterais foram então fixadas, pregando-se as laterais longitudinais e, por último, as laterais transversais.

3.3.3 Ferragens da viga

Para as ferragens transversais e longitudinais da laje da viga mista utilizou-se vergalhões de aço CA-50, de diâmetro igual a 10mm. O projeto estrutural seguiu o detalhamento especificado pela Figura 28.

No primeiro momento as bitolas das armaduras longitudinais e transversais foram medidas e cortadas seguindo-se as recomendações da NBR 14931, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). As mesmas foram então levadas até a mesa de dobra para que os ganchos de ancoragem fossem confeccionados. Como a bitola utilizada era de 10mm e a NBR 6118, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) recomenda que a ancoragem em ângulo reto não tenha comprimento inferior a 8Φ (oito vezes o diâmetro do vergalhão), o comprimento da ancoragem executado foi de 80mm.

Figura 28 - Projeto proposto para as ferragens utilizadas na viga mista de aço-concreto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após todas as ferragens longitudinais e transversais estarem devidamente prontas, iniciou-se a montagem. Inicialmente as ferragens inferiores foram distribuídas na laje, tanto as longitudinais quanto as transversais, sendo que em todos os transpasses a ferragem foi amarrada com arame recozido e nó simples. Posteriormente, a armadura superior foi distribuída e amarrada em todos os transpasses.

Para garantir o cobrimento mínimo, foram utilizados espaçadores de 20mm. Os mesmos foram fixados, tanto no sentido transversal, como no sentido longitudinal, a cada 800mm, ou sempre que houvesse a necessidade de manter o afastamento entre a caixaria e a ferragem.

3.3.4 Instrumentação da viga mista

Com o intuito de conhecer e entender o comportamento da estrutura como um todo durante o estudo experimental, a viga mista foi instrumentada em diversos pontos. Para isso foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (SG). Os extensômetros elétricos utilizados são da marca HT Sensor Technology, modelo BE 120-5AA-X-4cm (5x3), próprios para aço com comprimento de 5mm, resistência de $120 \pm 0.2\Omega$ e fator de correção $2.08 \pm 1\%$. Para coleta de dados utilizou-se o sistema de meia ponte de Wheatstone.

Para a instrumentação externa, utilizou-se transdutores de deslocamento (LVDT) da marca HBM, sensibilidade de 0,001mm e curso máximo de 10mm. Os LVDT's foram utilizados para medir deslocamento vertical (flecha), deslocamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto (*uplift*), e também o deslocamento horizontal da viga mista (para avaliar possíveis flambagens laterais ou torções).

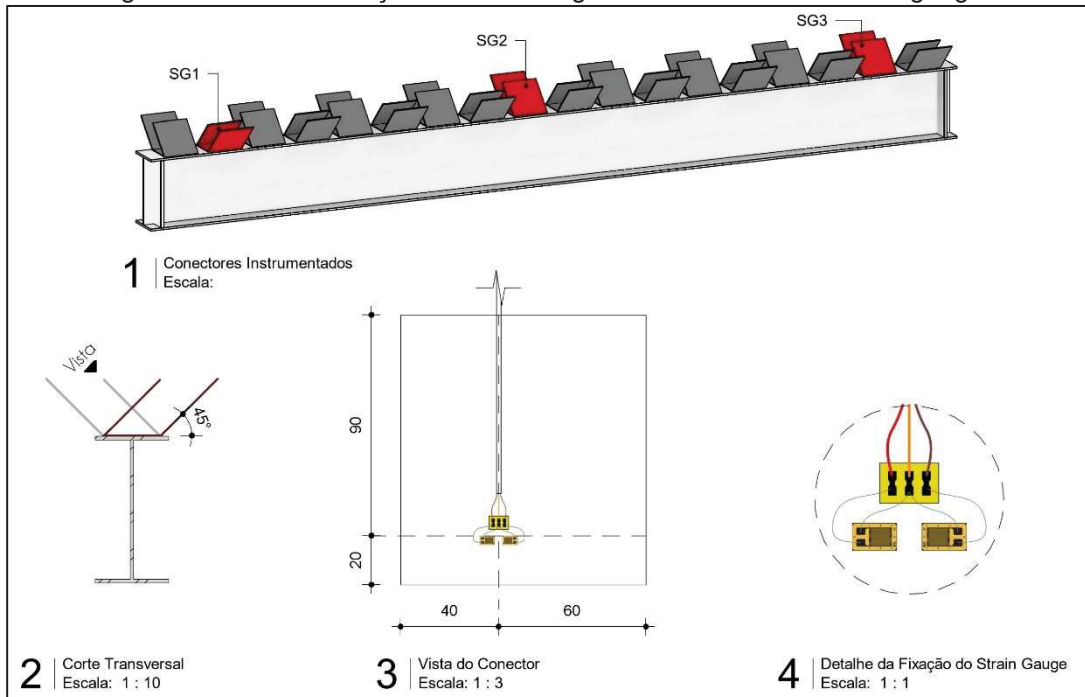
Como o equipamento responsável por adquirir os dados dos LVDT's e SG's possui oito entradas analógicas, a instrumentação ficou restrita a essa quantidade de respostas, sendo uma previamente reservada para a aquisição de dados da célula de carga.

A instrumentação utilizada teve como objetivo a mensuração das deformações específicas, deslocamentos verticais, esforços de cisalhamento e deslizamento na interface entre o perfil e a laje. A instrumentação foi realizada levando-se em consideração os estudos do item 2.3.1 Instrumentação em vigas mistas.

3.3.4.1 Instrumentação interna

Foram instrumentados internamente três conectores de cisalhamento: o segundo (SG1), o nono (SG2) e décimo sétimo (SG3), conforme destacado na Figura 29, detalhe 1. Os SG's foram fixados de forma distribuída sobre a viga no eixo longitudinal para que se consiga visualizar o comportamento dos conectores quanto à variação da força cortante, pois a maior solicitação no sistema adotado se dá sobre o apoio e o menor próximo ao centro do vão. Pode-se perceber que os conectores foram instrumentados sempre na aba interna ao perfil metálico, conforme especificado na Figura 29, detalhe 2 e na localização destacada na Figura 29, detalhe 3.

Figura 29 - Instrumentação interna na viga mista utilizando-se strain gauges



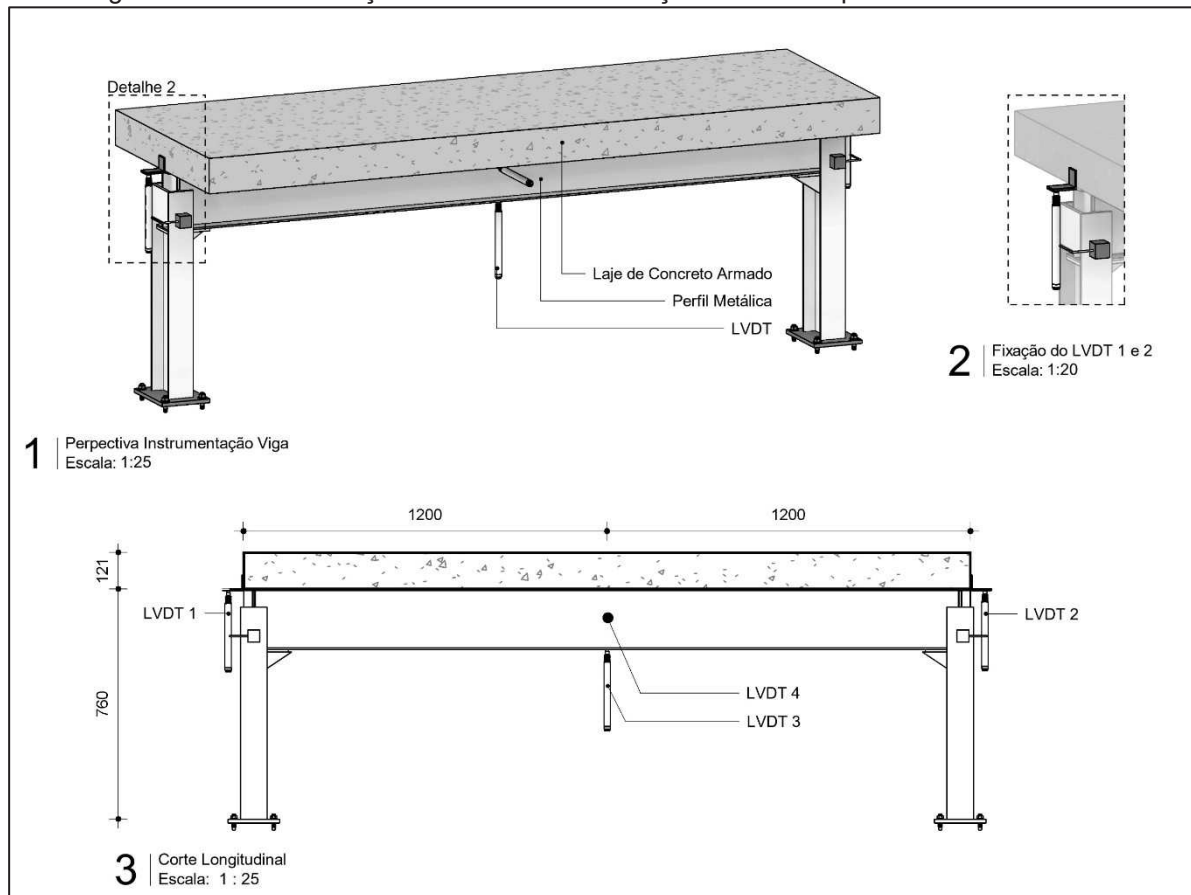
Fonte: Elaborado pelo autor.

Iniciou-se o processo de fixação lixando-se os conectores de cisalhamento nos locais onde seriam fixados os SG's, com o intuito de remover a fuligem e possíveis vestígios de oxidação (ferrugem). Após a regularização da superfície, a mesma foi limpa com álcool isopropílico para remoção de oleosidades. Em seguida, fixou-se a instrumentação com cola a base de epóxi (super bonder), para posterior soldagem da fixação. Após a soldagem das fiações, foi depositado sobre os SG's uma camada de silicone para garantir adequada impermeabilização e proteção mecânica à instrumentação.

3.3.4.2 Instrumentação externa

Foram utilizados quatro LVDT's (conforme Figura 30, detalhe 1 e 3), sendo dois deles nas extremidades para verificar o fenômeno de *uplift* (LVDT 1 e LVDT 2) fixados conforme Figura 30, detalhe 2. Um deles para mensurar a flecha máxima (LVDT 3) e o último fixado de forma transversal a viga e no meio do vão para avaliar possíveis flambagens laterais e torções (LVDT 4).

Figura 30 - Instrumentação externa com a utilização de LVDT's para o ensaio de flexão



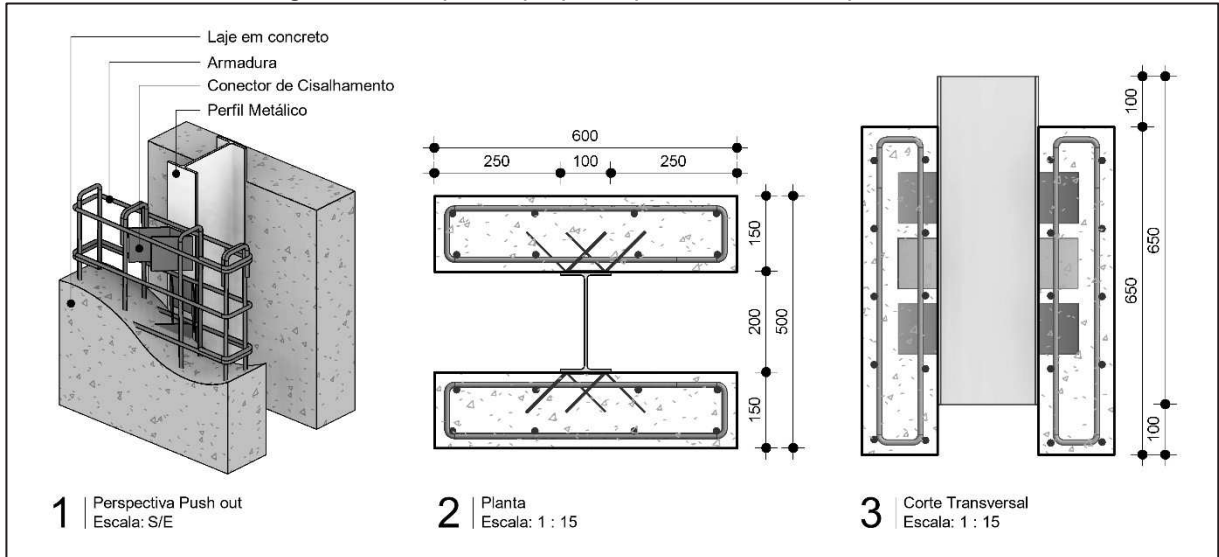
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 MODELO PARA O ENSAIO DE *PUSH OUT*

O aparato proposto para avaliar a ductilidade e a resistência ao cisalhamento do conector em questão se baseou nas recomendações da Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004). A Figura 31 exemplifica a visão geral do sistema ensaiado.

Da mesma forma que o realizado para as vigas mistas, foi preciso pensar em: caixarias, ferragens, disposição dos conectores de cisalhamento sobre a superfície do perfil utilizado e a instrumentação que seria utilizada para aquisição de dados.

Figura 31 - Esquema proposto para o modelo de *push out*



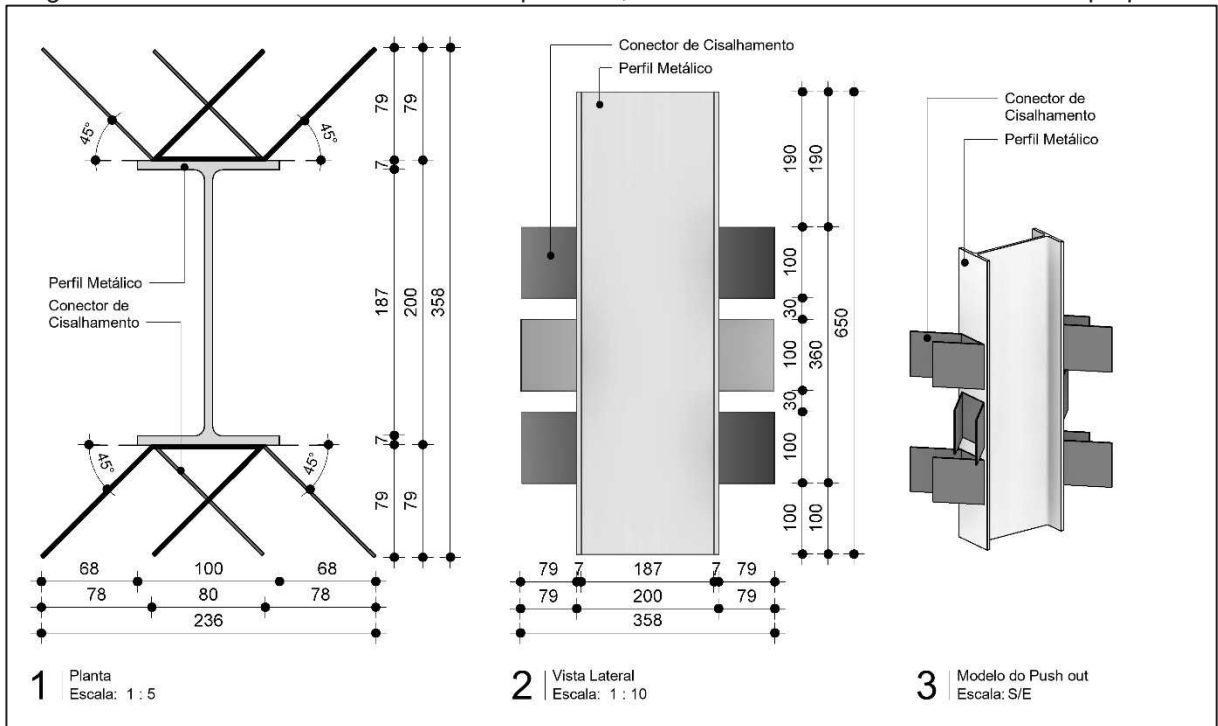
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.1 Produção do modelo ensaiado

O perfil metálico utilizado para o ensaio de cisalhamento direto (*push out*) não possuía as dimensões especificadas pela Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004), tendo em vista o alto custo de compra do mesmo, sendo que as empresas que comercializam tal produto vendem barras de 12000mm apenas. Dessa forma, decidiu-se utilizar um perfil metálico com a mesma seção transversal utilizada para a confecção da viga mista. O modelo ensaiado pode ser observado na Figura 32.

Primeiramente, o perfil metálico foi cortado com um comprimento de 650mm como especifica a Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004). O processo para fixação dos conectores de cisalhamento seguiu o mesmo processo relatado anteriormente para as vigas metálicas, utilizando-se gabaritos longitudinais e transversais para o correto espaçamento entre ambos. A solda utilizada para fixar o conector no perfil de aço foi do tipo MIG.

Figura 32 - Modelo utilizado no ensaio de *push out*, contendo o conector de cisalhamento proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

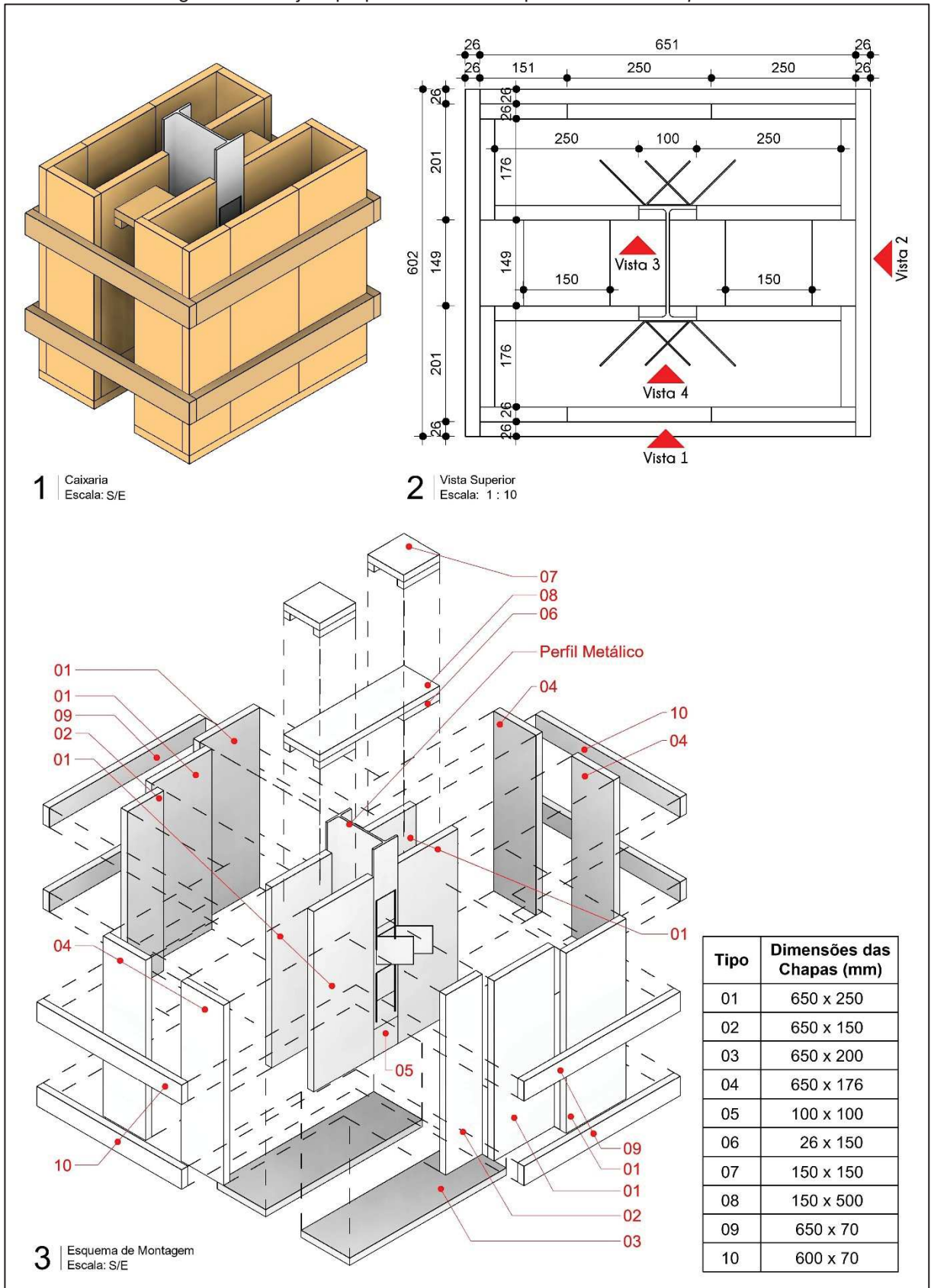
3.4.2 Caixaria do *push out*

As madeiras utilizadas para a confecção do modelo de *push out* possuíam as mesmas especificações das utilizadas para a construção das caixarias das vigas (pinus, de primeira e sem nó, com espessura de uma polegada).

As mesas de concreto utilizadas no ensaio seguiam as recomendações da Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004), possuindo cada uma 150mm de espessura, 650mm de altura e 600mm de largura. A quantidade de madeira utilizada, bem como a dimensão de projeto da caixaria pode ser observada na Figura 33 e Figura 34.

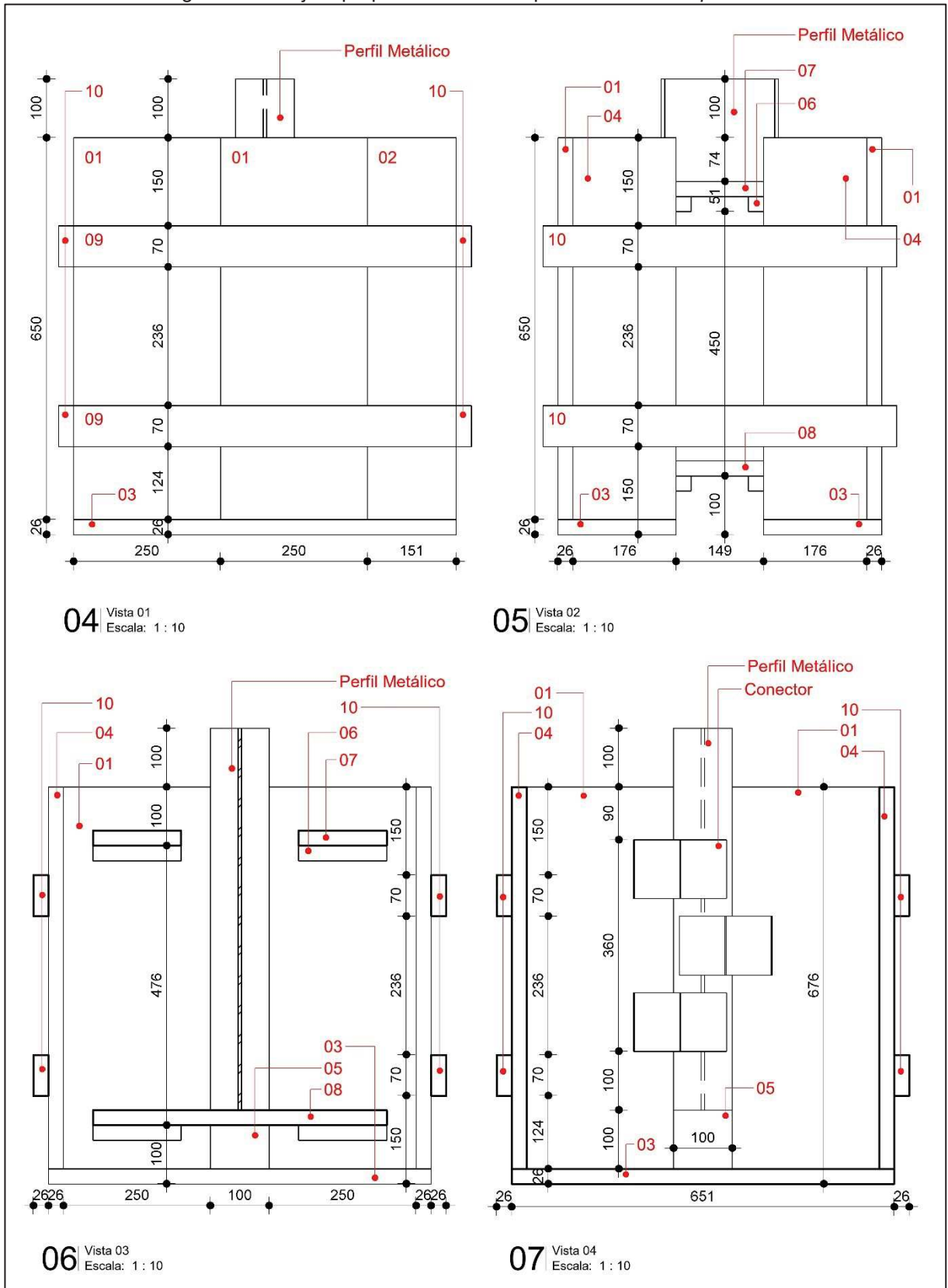
Com o auxílio do projeto, as madeiras foram medidas e posteriormente cortadas. Depois de cortadas, iniciou-se o processo de montagem, sendo seguido o projeto especificado. Vale ressaltar que as madeiras 1 e 2 especificadas na Figura 33 e 34 foram fixadas apenas após todo o processo de fixação da armadura e instrumentação interna ter sido finalizada, para que fosse possível o acesso ao conector de forma simples.

Figura 33 - Projeto proposto de caixa para o modelo de *push out*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Projeto proposto de caixa para o modelo de *push out*

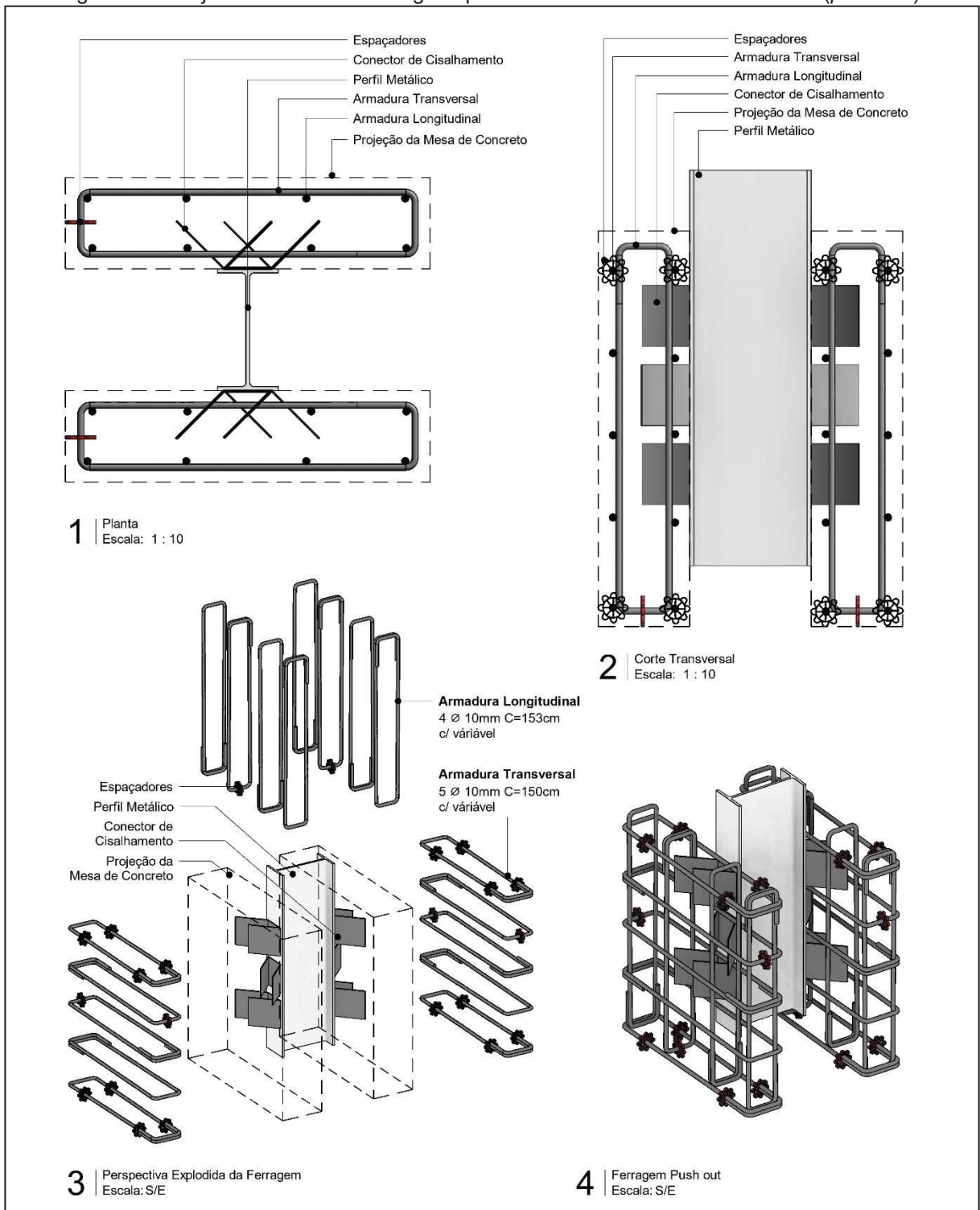


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3 Ferragens do *push out*

O projeto estrutural seguiu o detalhamento especificado pela Eurocode 4 da *European Committee for Standardization* (2004), e adaptado conforme Figura 35.

Figura 35 - Projeto executivo de ferragens para o ensaio de cisalhamento direto (*push out*)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as ferragens transversais e longitudinais do modelo *push out* utilizou-se vergalhões de aço CA-50, de diâmetro igual a 10mm. Foi adaptado os espaçamentos entre as ferragens, pois a norma exemplifica o ensaio do conector de cisalhamento padrão (*stud bolt*), porém os espaçamentos especificados não se adaptam ao conector proposto neste estudo.

3.4.4 Instrumentação do *push out*

Da mesma forma que realizado para as vigas mistas, o modelo de *push out* foi instrumentado para que fosse possível entender o comportamento do conector de cisalhamento proposto. Para isso foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (SG's). Os extensômetros elétricos utilizados são da marca HT Sensor Technology, modelo BE 120-5AA-X-4cm (5x3) próprios para aço com comprimento de 5mm, resistência de $120 \pm 0.2\Omega$ e fator de correção $2.08 \pm 1\%$. Para coleta de dados utilizou-se o sistema de meia ponte de Wheatstone.

Para a instrumentação externa utilizou-se transdutores de deslocamento (LVDT's) da marca HBM, sensibilidade de 0,001mm e curso máximo de 10mm. Os LVDT's foram utilizados para medir deslocamento relativo entre o perfil metálico e as lajes, juntamente com a separação transversal entre a laje e o perfil metálico.

Como o equipamento responsável por adquirir os dados dos LVDT's e dos SG's possui oito entradas analógicas, a instrumentação ficou restrita a essa quantidade de respostas, sendo uma previamente reservada para a aquisição de dados da célula de carga.

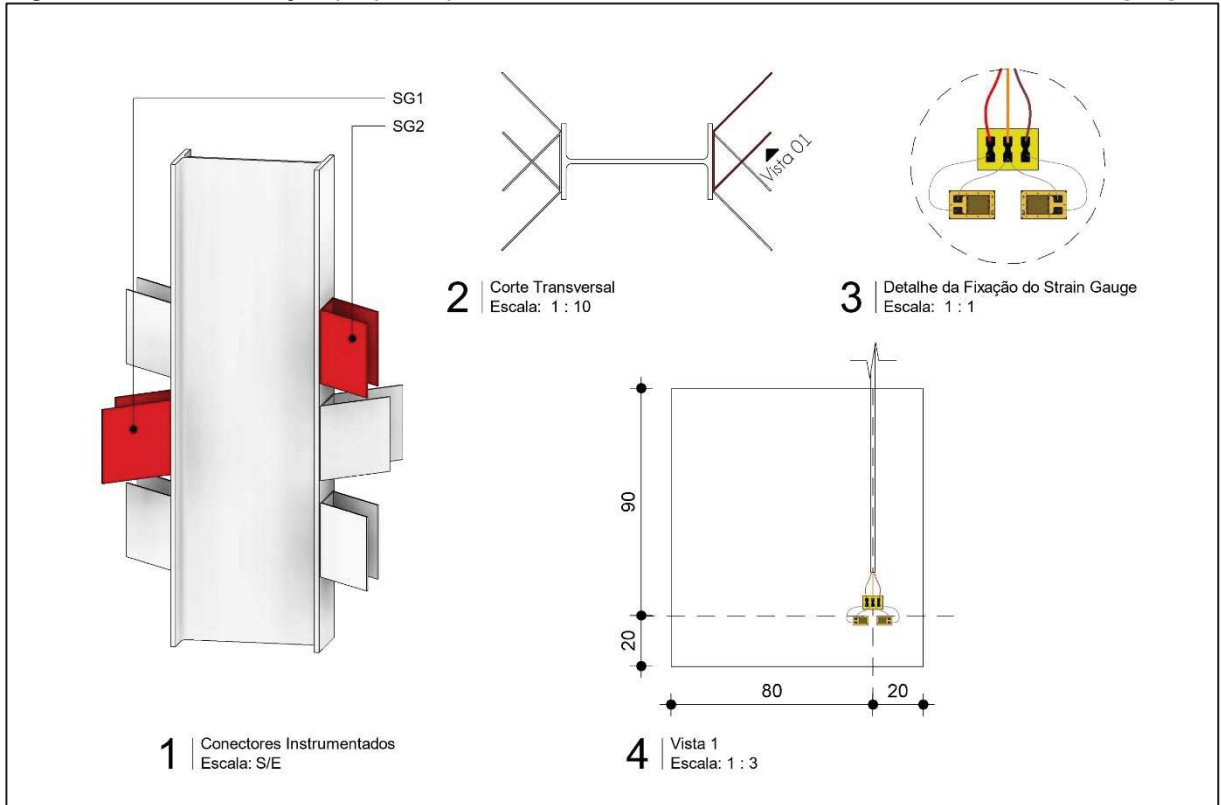
A instrumentação utilizada teve como objetivo a mensuração das deformações específicas do conector, deslocamentos verticais entre o perfil metálico e a laje, bem como afastamento horizontal na interface entre o aço e o concreto. A instrumentação dos conectores de cisalhamento foi realizada tendo em vista os estudos do item 2.3.2 Instrumentação em ensaios de cisalhamento direto (*push out*).

3.4.4.1 Instrumentação interna

Os SG's foram fixados o mais perto possível da base, pois a maior concentração de forças de cisalhamento se encontra neste local, ou em locais onde exista uma perda de seção do conector, o que não se aplica a este estudo.

Para uma fácil compreensão da instrumentação utilizada para mensurar as propriedades que se quer adquirir no ensaio de cisalhamento direto, pode-se observar os detalhes especificados na Figura 36.

Figura 36 - Instrumentação proposta para o ensaio de cisalhamento direto utilizando-se *strain gauges*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram instrumentados dois conectores de cisalhamento, sendo um de cada lado do modelo de *push out*, conforme pode ser observado na Figura 36, detalhe 1. Como foi optado por um circuito de meia ponte de Wheatstone, foram utilizados dois SG's para cada ponto instrumentado, conforme especificado pela Figura 36, detalhe 3. Os dois lados foram instrumentados para que fosse possível a verificação da simetria quanto à deformação, uma vez que a aplicação das cargas também ocorreu de forma simétrica.

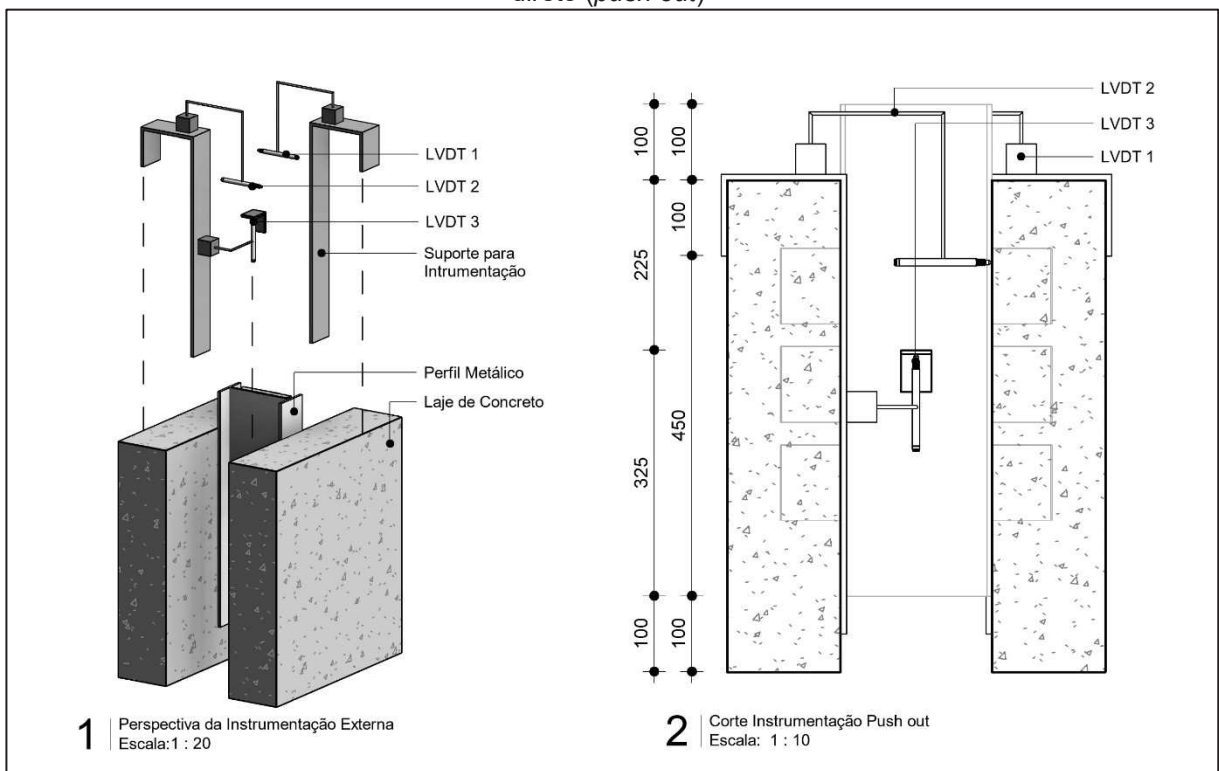
O processo de fixação dos SG's ocorreu da mesma forma relatado para a viga mista. Os conectores foram lixados, e posteriormente, limpos com álcool isopropílico. Em seguida a instrumentação foi fixada e protegida com uma camada de silicone.

3.4.4.2 Instrumentação externa

Como pode ser observado na Figura 37, detalhe 1, para o ensaio de *push out* foi adaptado um suporte utilizado para a instrumentação externa (LVDT), conforme estudos realizados por Cavalcante (2010). Este aparato serviu como apoio para as bases magnéticas, que por sua vez deram suporte aos LVDT's.

Para o estudo foram utilizados 3 LVDT's, um para medir o deslocamento vertical entre o perfil metálico e a laje de concreto (LVDT 3) e mais dois para medir possíveis deslocamentos horizontais (LVDT 1 e 2). A localização da instrumentação pode ser observada na Figura 37, detalhe 1 e 2.

Figura 37 - Instrumentação externa utilizando LVDT's para realização do ensaio de cisalhamento direto (*push out*)



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 CONCRETAGEM DA VIGA MISTA E DO MODELO DE *PUSH OUT*

Utilizou-se concreto usinado com resistência de 25MPa para a concretagem da viga mista e do modelo de *push out*.

Foram realizados ensaios no concreto para conhecer as características físicas do material. No estado fresco foi realizado o ensaio de consistência por abatimento

de tronco (*slump test*) seguindo-se as diretrizes da NBR NM 67, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998).

Para os ensaios no estado endurecido foram moldados oito corpos de prova cilíndrico de diâmetro 100mm, conforme as recomendações da NBR 5738, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). Após a moldagem os corpos de prova foram colocados sobre uma superfície rígida e livre de vibrações. Durante as primeiras 24h os corpos de prova ficaram armazenados em local protegido de intempéries. Depois de desmoldados os corpos de prova foram submersos em água saturada com hidróxido de cálcio até o momento de ruptura.

Foram realizados ensaios para verificação da resistência à compressão, conforme preconiza a NBR 5739, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007) e também para verificação da resistência à tração por compressão diametral, conforme NBR 7222, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011).

O procedimento de concretagem seguiu as recomendações da NBR 14931 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). Antes do início da concretagem as caixarias foram molhadas para que a madeira não absorvesse a umidade do concreto. Para o ensaio de *push out*, a superfície do perfil em contato com o concreto foi engraxada, eliminando, portanto, a aderência e força de atrito, conforme orienta a Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004).

O modelo de *push out* foi concretado primeiramente. As duas lajes foram concretadas no mesmo dia, diferente do que prevê a Eurocode 4 da *European Committee for Standardization* (2004). Esse processo aconteceu para que as características do concreto não variassem. Diversos autores realizaram o processo da mesma forma e pelos mesmos motivos, dentre eles pode-se citar Titoum et al. (2016), Prakash et al. (2012), Vianna et al. (2010) e Veríssimo et al. (2007)

Para o adensamento do concreto utilizou-se vibrador da marca Bosch modelo GVC22EX com capacidade de 2200 vibrações por minuto e diâmetro de 32mm para tornar a massa homogênea e proporcionar maior dureza e resistência ao material.

Em seguida, a laje da viga mista foi concretada, e o processo ocorreu da mesma forma. Com o auxílio de um carrinho o concreto era colocado sobre a laje, e posteriormente, o mesmo era vibrado (com o mesmo equipamento). O acabamento foi realizado com régua metálica e desempenadeira.

Durante a concretagem foram tomadas as providências necessárias para com a instrumentação já fixada nos aparatos. O concreto era despejado nas laterais e o

vibrador em nenhum momento foi posto sobre a instrumentação. Nesses locais o vibrador era encostado nas caixarias e ferragens para adensar e retirar os vazios.

Após o término da concretagem, os aparatos eram molhados duas vezes ao dia, para evitar trincas devido à liberação de calor proveniente do processo de cura do concreto.

3.6 ENSAIOS

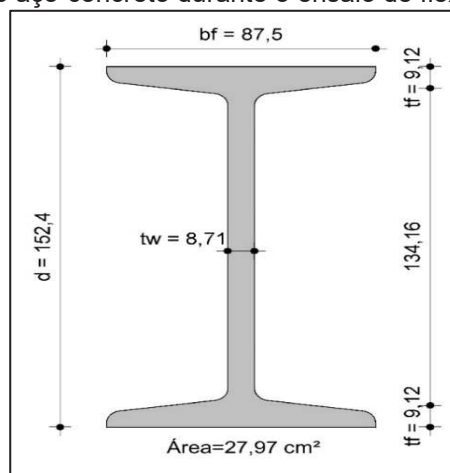
Para o ensaio de flexão na viga mista e ensaio de *push out* utilizou-se um pórtico universal com capacidade de aplicação de carga de até 100 toneladas. Os valores de deformação específicas registradas através dos LVDT's e SG's foram obtidas para cada aplicação de carga com o auxílio de um amplificador universal compacto de 8 canais da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH), modelo DAQ universal MX840B e com *software* de aquisição de dados Catman.

3.6.1 Ensaio de flexão na viga mista

3.6.1.1 Pilar metálico para ensaio de flexão

Para os ensaios de flexão foi projetado um pilar metálico para servir de apoio para as vigas metálicas. Utilizou-se o perfil I da Gerdal produzido em aço ASTM A36, bitola de 6" com peso de 22kg/m e dimensões conforme a Figura 38. O perfil possui abas inclinadas oferecendo maior resistência e robustez e uma altura de 700mm.

Figura 38 - Perfil metálico usado para produção dos pilares utilizados como apoios para a viga mista de aço-concreto durante o ensaio de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6.1.1.1 Produção do blanque metálico

O pilar foi fixado no bloco de reação do pórtico estrutural do laboratório de estruturas da Unochapecó, utilizando-se um blanque de chapa de aço-carbono com espessura de $\frac{1}{2}$ " e dimensões de 170x240mm. Para a fixação utilizou-se quatro *parabolts* de $\frac{1}{2}$ " por chapa.

A chapa foi cortada em uma serra de fita horizontal da marca Franho, modelo FM400, com capacidade de corte de até 200mm. Depois de cortada nas dimensões necessárias, as chapas foram furadas para fixação dos *parabolts*. Utilizou-se uma furadeira de bancada da marca Merlo, modelo Fb16 e broca com diâmetro de 14mm, para que houvesse folga na estrutura. Posteriormente, a broca de 14mm foi trocada por uma de 28mm para que o processo de escareamento fosse realizado.

Após a finalização do processo foi utilizado uma lixadeira manual com disco *flap-disc* para dar acabamento nas peças.

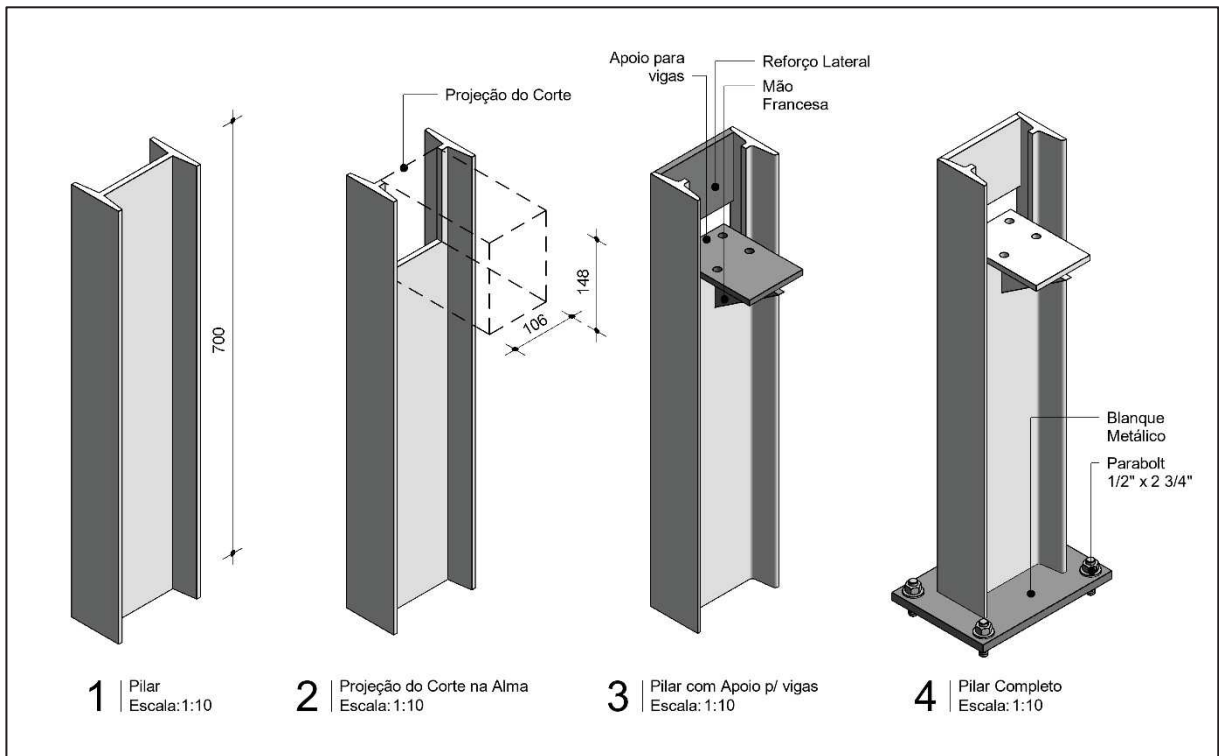
3.6.1.1.2 Confecção do pilar

Como a viga ensaiada tem altura de 148mm e largura de 100mm foi realizado corte na alma do pilar de 148mm de altura por 106mm de largura, para que a viga pudesse ser encaixada com certa folga. O processo de montagem pode ser observado na Figura 39.

Inicialmente, com a ajuda de um paquímetro e um esquadro, o pilar foi marcado. Com o auxílio de uma lixadeira manual com disco de 7" os cortes verticais foram realizados na alma dos dois pilares. O disco de 7" foi então trocado por um disco de 4" para realizar o corte horizontal, também na alma (Figura 39, detalhe 2). O processo de acabamento foi muito importante, pois pode-se realizar os testes para verificar se a viga realmente encaixaria na estrutura, fazendo as correções necessárias.

Após o processo de corte do pilar foi produzida a chapa ao qual a viga ficaria apoiada e também o fechamento da parte traseira do pilar, esta última possuía duas funções: reforçar a estrutura, pois foi retirado um pequeno pedaço da alma e também para servir de fechamento e facilitar o encaixe das vigas (Figura 39, detalhe 3). O próprio pedaço retirado da alma do pilar foi utilizado como apoio para as vigas.

Figura 39 - Pilar metálico construído para ser utilizado como apoio (de segundo gênero) para a viga mista durante o ensaio de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor.

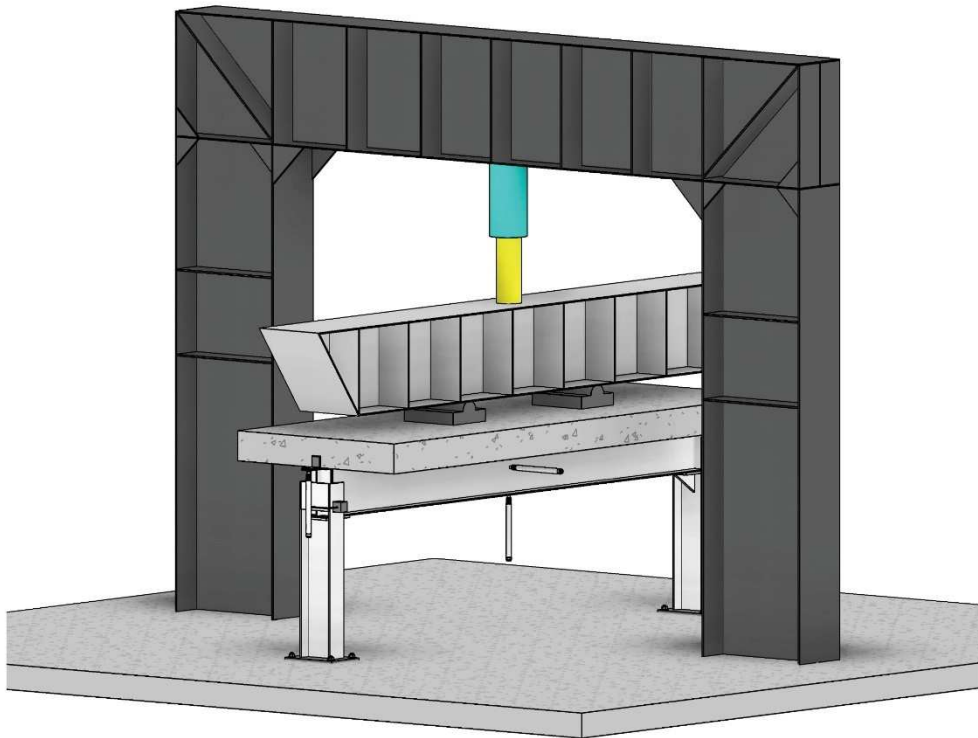
Para dar suporte aos apoios foram produzidas duas mãos francesas (uma para cada pilar), as quais tinham formato triangular e dimensões de 120x80mm, com espessura de 10mm (Figura 39, detalhe 3).

Depois de todas as partes prontas o sistema foi então finalizado, sendo as peças pré-fixadas com pingos de solda. Depois da fixação a viga foi colocada sobre o aparato para verificar os encaixes. Posterior a conferência, o pilar foi então soldado (solda MIG) em todas as junções. Por último, os pilares foram pintados de cinza para prevenir ataques de intempéries.

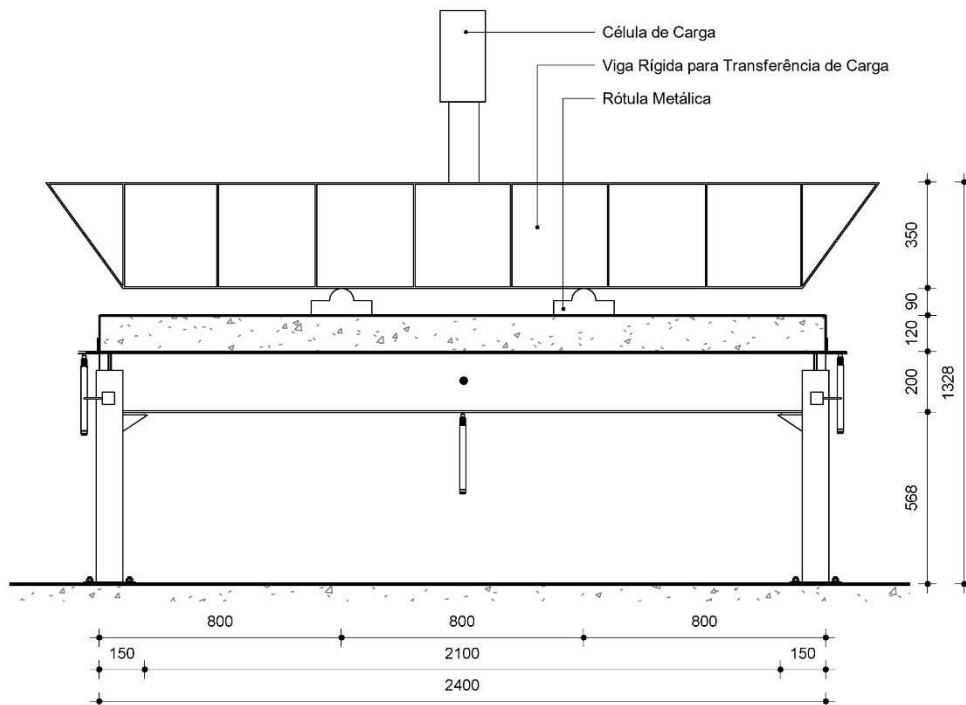
3.6.1.2 Ensaio de flexão na viga mista

Para testar o comportamento do conector proposto bem como da instrumentação foi realizado ensaio de flexão em uma viga mista. No primeiro momento a viga a mista foi transportada com o auxílio de uma talha metálica e disposta sobre os pilares projetados (Figura 39). Feito isto, a instrumentação externa foi fixada e o sistema proposto para distribuição das cargas executado. A visão global do ensaio de flexão pode ser observada na Figura 40.

Figura 40 - Visão global do ensaio de flexão em viga mista



1 | Perspectiva do Ensaio Flexão em Viga Mista
Escala: S/E



2 | Corte Longitudinal
Escala: 1 : 25

Fonte: Elaborado pelo autor.

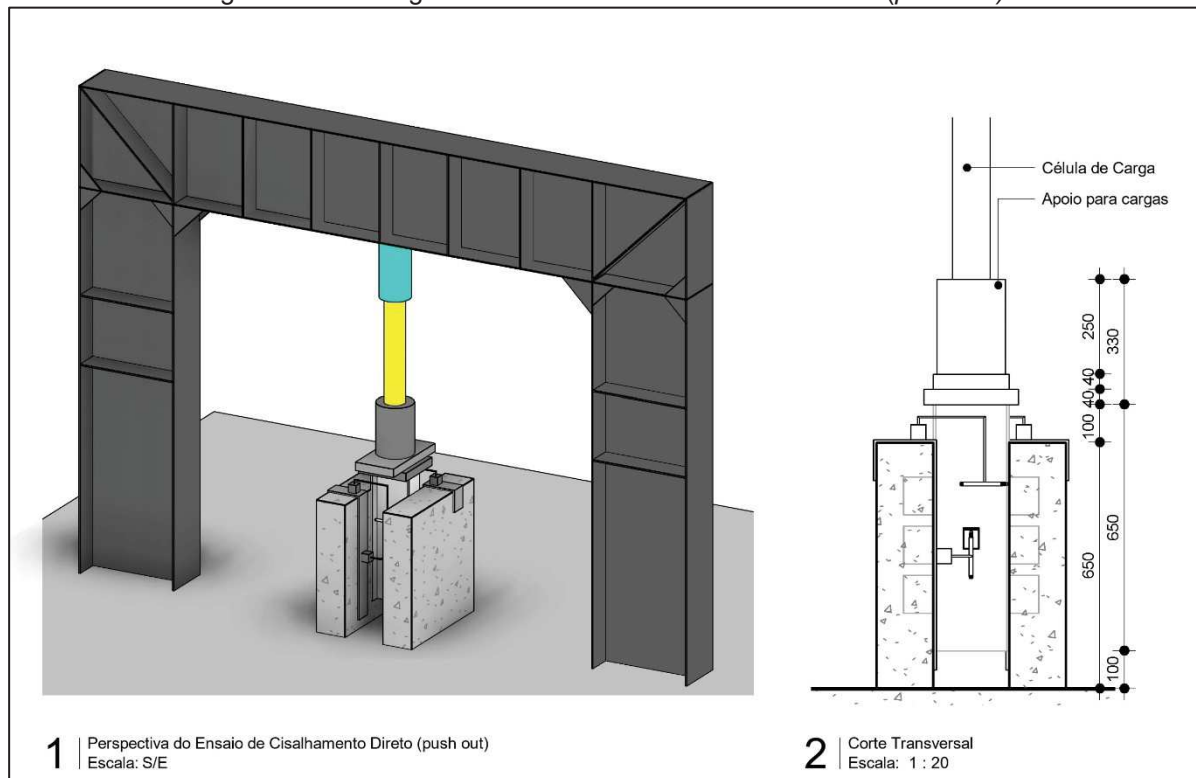
3.6.2 Ensaio de *push out*

O ensaio de *push out* não foi realizado conforme a Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004). Isso por que, segundo a norma, o ensaio deve ser realizado seguindo-se os passos:

- (i) inicialmente, aplica-se incrementos de força até que se atinja 40% da força máxima esperada;
- (ii) em seguida, aplicam-se 25 ciclos de carregamentos com força variando entre 5% e 40% da força máxima;
- (iii) os incrementos de força após a fase cíclica devem ser aplicados de modo a não provocar ruptura antes de um período de 15 minutos;
- (iv) o deslocamento relativo entre laje de concreto e viga de aço deve ser monitorado em todo o ensaio, desde o início do carregamento até que a força decresça em 20% do valor máximo;
- (v) deve-se também monitorar, próximo de cada grupo de conectores, a separação transversal entre mesa e laje.

Porém, por se tratar de um elemento ainda não normatizado/existente, a única forma de conhecer a real resistência era por meio de modelagem matemática com elementos finitos (que não é o objetivo deste trabalho), ou realizando-se o ensaio de *push out* com carregamento monolítico ao invés de cíclico, como recomenda-se a norma. Dessa forma, optou-se por realizar o ensaio de forma que o carregamento fosse contínuo (monolítico).

Com o auxílio da talha metálica, o modelo do *push out* foi transportado até o local do ensaio. O sistema foi então instrumentado, e posteriormente, aplicou-se carga de forma monolítica sobre o elemento. A visão global do ensaio de cisalhamento direto pode ser observada na Figura 41.

Figura 41 - Visão global do ensaio de cisalhamento direto (*push out*)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 VIABILIDADE ECONÔMICA

Para o valor do *stud* foram consultadas empresas em diversas cidades de Santa Catarina. Foram solicitados os valores de compra (pino + anel) e fixação do *stud bolt* de 19x80mm (espessura x altura), tendo em vista que o mesmo foi o mais utilizado como critério de comparação nas pesquisas consultadas durante a revisão bibliográfica da literatura.

Assim, levantou-se o valor médio da produção e execução do conector proposto neste estudo para fins de comparação com o conector padrão proposto pela NBR 8800, da Associação Brasileira de Normas técnicas (2008).

Vale ressaltar que a solda utilizada para a fixação do *stud bolt* não é a convencional do tipo MIG, e sim por eletrofusão, o que torna o processo mais caro e complexo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INSTRUMENTAÇÃO PROPOSTA PELO AUTOR

Por meio dos ensaios realizados pôde-se perceber que a instrumentação proposta neste estudo se mostrou eficiente, uma vez que foi possível realizar coleta dos dados que o estudo se propôs a aquiritar.

Nos próximos itens é apresentado e discutido os resultados experimentais obtidos por meio das instrumentações, bem como os observados externamente.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

No estado fresco avaliou-se a trabalhabilidade do concreto (*slump test*). No estado endurecido analisou-se as resistências à compressão e à tração na compressão diametral. Constatou-se um *slump* de 130mm, enquanto as características mecânicas podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização das propriedades mecânicas do concreto utilizado para moldar a viga mista e o modelo de *push out*

CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	PESO (kg)	FORÇA (kN)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO (MPa)
CP1	9,873	19,483	3,79	191,25	24,98	
CP2	9,956	19,115	3,74	191,50	24,60	
CP3	9,992	19,373	3,80	186,66	23,80	
CP4	9,965	19,095	3,68	187,35	24,02	
CP5	9,973	19,295	3,78	62,85		2,08
CP6	10,008	19,303	3,78	78,75		2,60
CP7	9,839	19,339	3,80	60,92		2,04
CP8	9,959	19,276	3,78	63,67		2,11

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados de caracterização percebe-se que o concreto utilizado possuía boa trabalhabilidade e resistência potencial média de 25MPa.

4.3 ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGA MISTA

A instrumentação proposta para o ensaio de flexão em viga mista permitiu a aquisição de dados para que fosse possível compreender o comportamento da

estrutura quando submetida ao ensaio de flexão. Dessa forma, foram coletados dados de deslocamento vertical, deslocamento horizontal da viga, deslocamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto (*uplift*) e também as microdeformações causadas nos conectores.

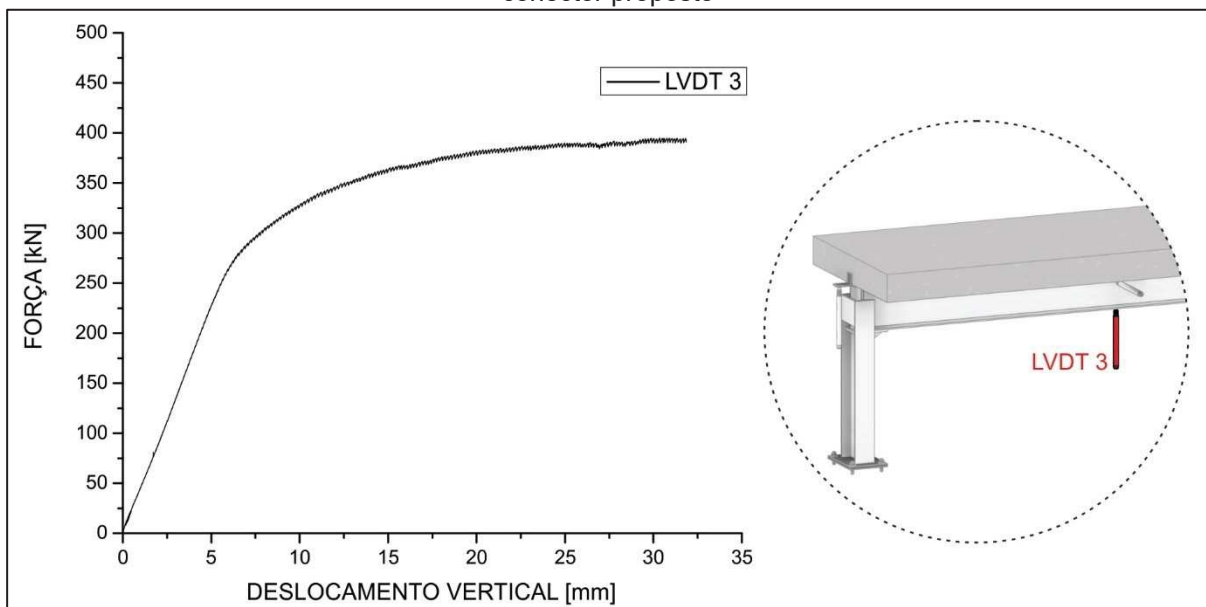
4.3.1 Deslocamento vertical da viga mista (flecha)

Com o ensaio de flexão foi possível perceber o comportamento da viga mista quando submetida à aplicação das cargas. A Figura 42 demonstra o deslocamento vertical observado no ensaio de flexão. Percebe-se que o máximo deslocamento apresentado foi de aproximadamente 32,05mm e que a carga máxima foi de aproximadamente 392,06kN.

Analisando-se o gráfico percebe-se que até na carga aproximada de 270kN a deformação ocorria de forma linear, provavelmente ocorrendo uma deformação elástica na estrutura. A partir de 270kN a deformação se acentua, mesmo com o acréscimo de força relativamente baixo. Acredita-se que tal fenômeno ocorre, pois, o sistema estrutural começou a entrar na faixa de deformação plástica.

A flecha relativamente baixa pode ter ligação com o sistema de apoio proposto neste estudo, uma vez que a viga era parafusada sobre o pilar causando um engaste parcial na estrutura.

Figura 42 - Deslocamento vertical observado no ensaio de flexão em viga mista, com a utilização do conector proposto



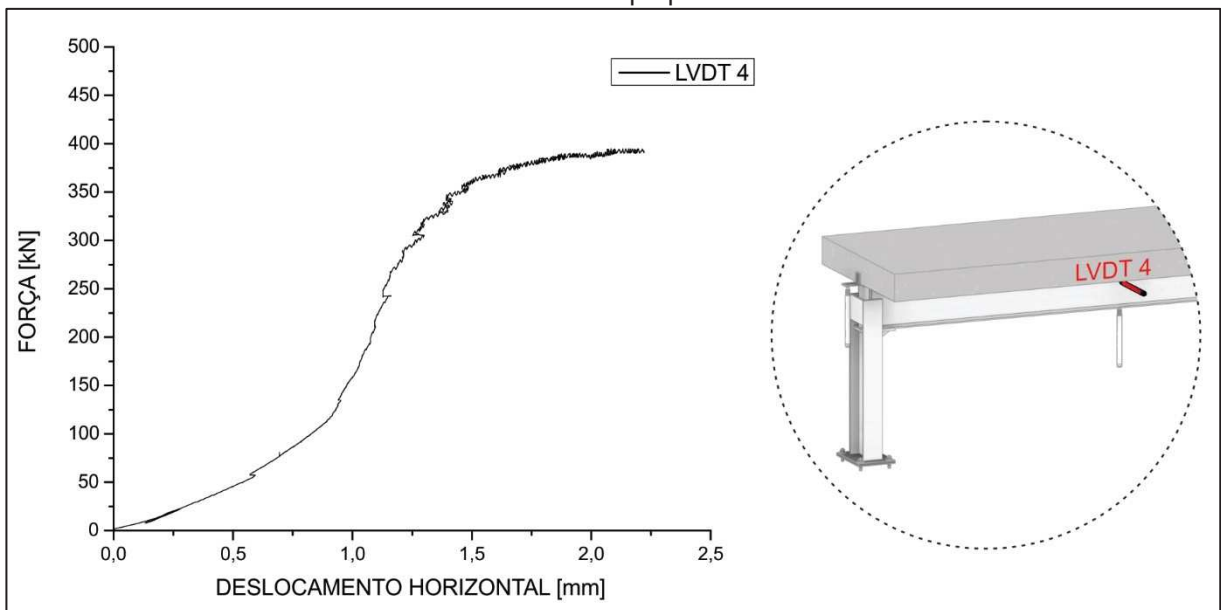
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Deslocamento horizontal da viga mista

Uma das principais preocupações do estudo estava ligado diretamente com a possibilidade de o sistema proposto sofrer torção ou mesmo flambagem lateral com a aplicação das cargas. Dessa forma, foi fixado um LVDT4 na lateral da viga metálica para monitor as possíveis movimentações nesse ponto. Como pode ser observado na Figura 43, as movimentações foram mínimas, sendo a máxima observada de aproximadamente 2,2mm.

Com os resultados observados fica evidente que o sistema proposto para o ensaio, bem como os enrijecedores que foram fixados sobre os apoios da viga, impediram a torção e a flambagem lateral.

Figura 43 - Deslocamento horizontal observado no ensaio de flexão em viga mista, com a utilização do conector proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Deslocamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto (*uplift*)

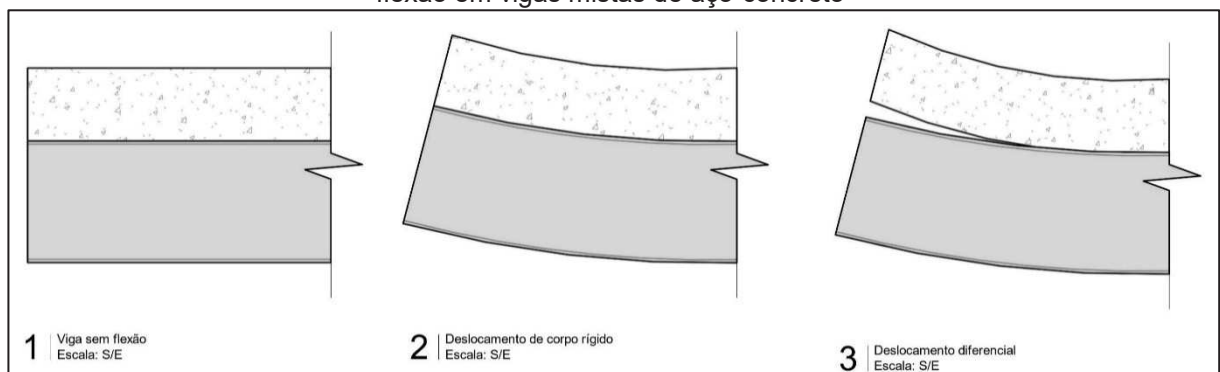
O deslocamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto é um dos resultados mais importantes obtidos no ensaio de flexão, uma vez que é por meio dos mesmos que pode-se perceber se o sistema apresentou interação total ou parcial, sendo que tais resultados impactam diretamente na criação das linhas neutras que são muito importantes no processo de cálculo das estruturas mistas.

Observando-se a Figura 45 percebe-se que houve um deslocamento

significativo entre a instrumentação e a laje de concreto (onde o LVDT1 foi fixado). Porém, o resultado de deslocamento não diz respeito ao fenômeno de *uplift*, uma vez que tal deslocamento está ligado diretamente a deformação que ocorreu na viga mista. Durante a aplicação das cargas a viga começou a se deformar. Conforme a flecha aumentava, a laje se deformava e os apoios giraram. Mesmo com a utilização dos parafusos para fixação do sistema, ainda houve giro sobre os apoios, visto que o pilar utilizado chegou a ter pequenas deformações, percebidas de forma visual.

Visualmente constatado, conforme as deformações aconteciam não era percebido nenhum deslocamento real em relação a laje e o perfil metálico, mas sim um deslocamento conjunto de todo o sistema (aço-concreto), sem que ocorresse o fenômeno de *uplift*. Assim sendo, pode-se afirmar que houve deslocamento de corpo rígido (Figura 44, detalhe 2) e não deslocamento diferencial entre a mesa de concreto e o perfil metálico (Figura 44, detalhe 3).

Figura 44 - Tipos de deslocamentos possíveis causados através da aplicação de carga no ensaio de flexão em vigas mistas de aço-concreto



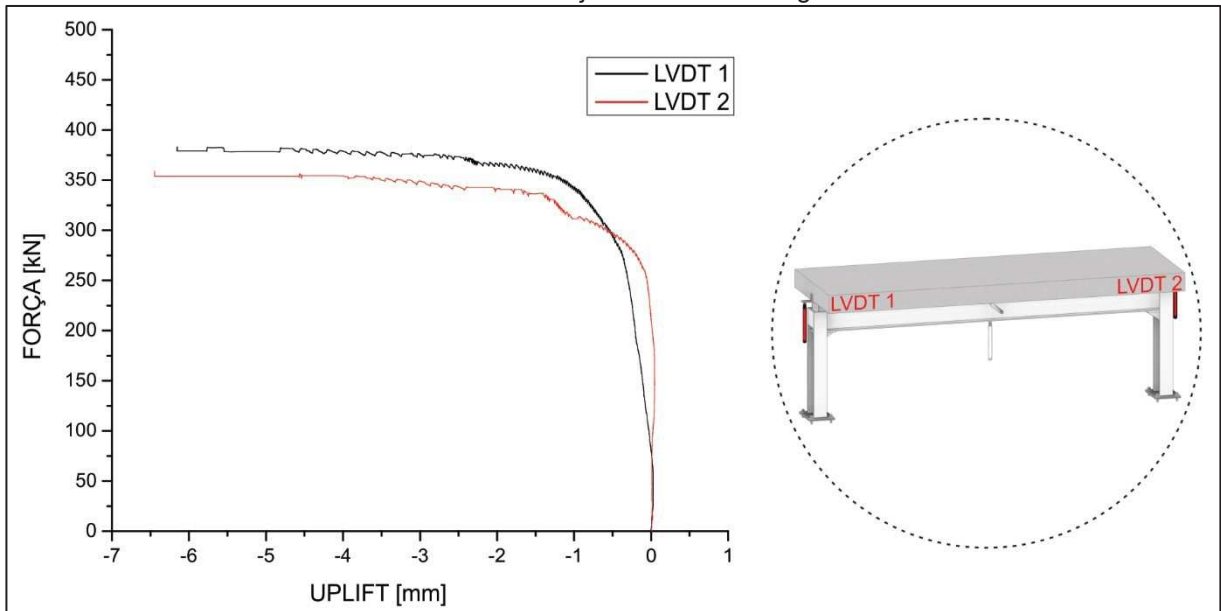
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, se for realizado uma relação entre o gráfico de deslocamento vertical (Figura 42) e o gráfico de deslocamento relativo entre a laje e o perfil (Figura 45), percebe-se que quando o sistema chega às cargas superiores a 270kN ambos os resultados se intensificam, portanto, dando suporte as informações já relatadas de que o fenômeno observado não diz respeito ao *uplift*.

Outro ponto importante percebido durante o ensaio está ligado às cantoneiras metálicas utilizadas como referência para medição. Com a deformação da laje os LVDT's responsáveis por medir os dados "escaparam" da aba da cantoneira e pararam de adquirir os dados, ficando claro que as mesmas deveriam ter dimensões

maiores para poder acompanhar as deformações e medir os dados até a conclusão do ensaio.

Figura 45 - Dados coletados através da instrumentação proposta para observar possíveis deslocamentos entre a laje de concreto e viga metálica



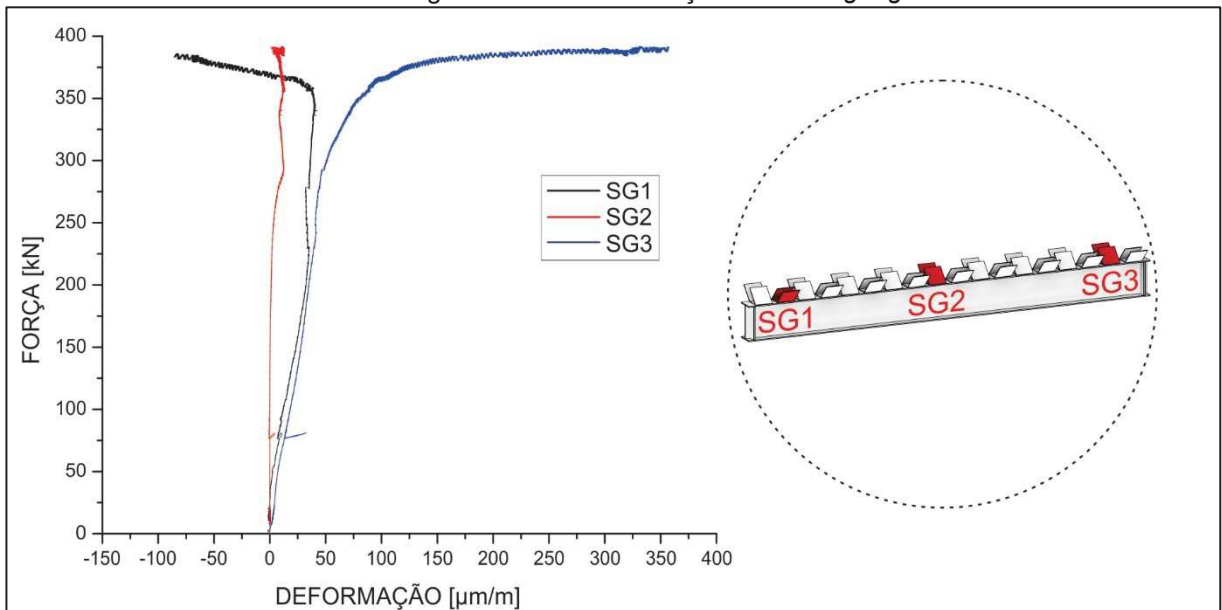
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Microdeformações causadas nos conectores de cisalhamento submetidos ao ensaio de flexão

Os SG's foram utilizados para entender o comportamento do conector de cisalhamento proposto, quando submetido às cargas do ensaio de flexão. Dois foram dispostos perto dos apoios (um de cada lado) e um no meio do vão. Como perto dos apoios a força transversal cisalhante é maior e no meio do vão tende a ser nula, esperava-se encontrar deformações diferentes.

Como pode ser observado na Figura 46, o SG2 fixado no meio do vão não sofre nenhuma microdeformação significativa e se mantém constante durante todo o ensaio. O SG1 e SG3 que foram colocados nas pontas apresentaram comportamento parecido até a carga aproximada de 225kN, a partir desse momento começaram a ocorrer microdeformações diferentes e na carga de aproximadamente 360kN os dois se deformam em direções diferentes. Acredita-se que essa deformação em direções diferentes está ligada ao fato de que na parte inferior da laje de concreto (onde os SG's foram fixados) ocorrem forças de tração no concreto, forças essas com sentidos opostos, o que justifica o comportamento das microdeformações.

Figura 46 - Microdeformações observadas nos conectores de cisalhamento, durante o ensaio de flexão em viga mista com a utilização de *strain gauges*



Fonte: Elaborado pelo autor.

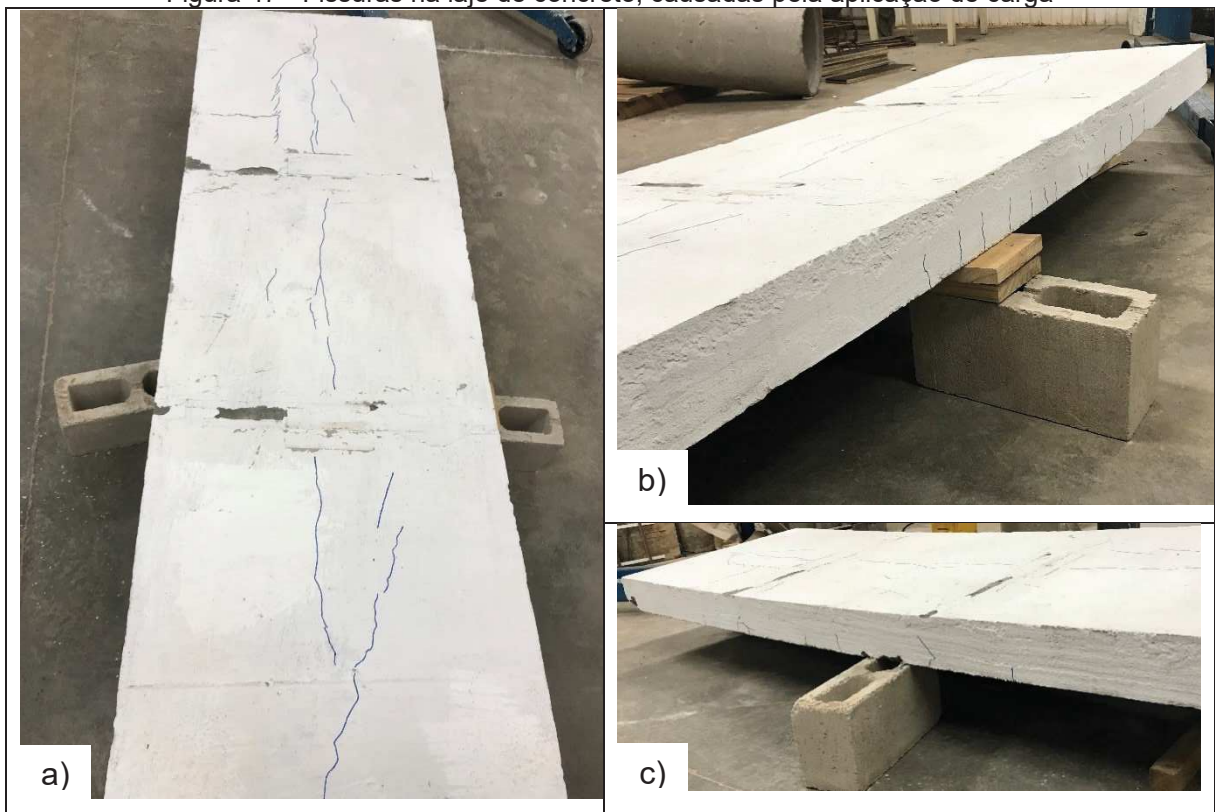
4.3.5 Avaliações pós-ensaio

Após o rompimento da viga a mesma foi retirada dos apoios para análise das falhas. Como a estrutura foi toda pintada com cal branco, a visualização das fissuras ficou mais fácil e evidente. Todas as fissuras foram destacadas com marcador permanente azul, para que fosse mais fácil a percepção e análise das fissuras.

Percebe-se na Figura 47A que as fissuras longitudinais ocorreram na laje exatamente sobre a viga/conectores de cisalhamento. Isso porque a concentração de tensão nesse ponto é maior, uma vez que os conectores de cisalhamento são responsáveis por transmitir os esforços cisalhantes da laje de concreto para a viga metálica.

Nas laterais, poucas foram as fissuras observadas. A Figura 47B e 47C apresentam as fissuras laterais transversais, o que já era esperado uma vez que a parte inferior da laje sofreu tensões de tração e o concreto não resiste bem a tal esforço.

Figura 47 - Fissuras na laje de concreto, causadas pela aplicação de carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, a laje de concreto foi rompida para verificar possíveis deformações nos conectores de cisalhamento ou mesmo nas ferragens longitudinais e transversais. Como o rompimento da laje de concreto é um processo difícil de ser realizado e, tendo em vista que as leituras mostraram dados muito semelhantes entre as microdeformações ocorridas nos conectores, optou-se por romper apenas um dos lados da estrutura, próximo aos apoios, pois a concentração de tensão neste local é maior.

Com a utilização de um martelo perfurador e rompedor, da marca DeWALT, modelo D25501k, o concreto foi rompido em uma das extremidades, como pode ser observado na Figura 48A. Durante o processo de rompimento, tomou-se muito cuidado para que o equipamento não danificasse os conectores.

Observando-se a Figura 48B, percebe-se que o conector de cisalhamento estava praticamente intacto, apresentando mínimas deformações perceptíveis a olho nu. As ferragens transversais e longitudinais também não apresentaram nenhum tipo de deformação/escoamento. Dessa forma, pode-se afirmar que o conector de cisalhamento se comportou de forma eficiente durante as solicitações, garantindo a

transferência de tensões solicitantes sem apresentar grandes deformações ou mesmo ruptura.

Figura 48 - Rompimento da laje de concreto e verificação do comportamento do conector de cisalhamento proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro fator importante observado após o rompimento da laje diz respeito à instrumentação utilizada para aquisição de dados, sendo que a mesma ainda se apresentava protegida (Figura 48C).

Do exposto, percebe-se que o modo de ruptura da viga mista se deu pelo esmagamento da região comprimida da mesa de concreto.

4.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO (*PUSH OUT*)

A instrumentação proposta para o ensaio de cisalhamento direto permitiu a aquisição de dados para que fosse possível compreender o comportamento da estrutura e do conector de cisalhamento proposto. Dessa forma, foram coletados

dados de deslocamento vertical, deslocamento horizontal das lajes e também as microdeformações causadas nos conectores.

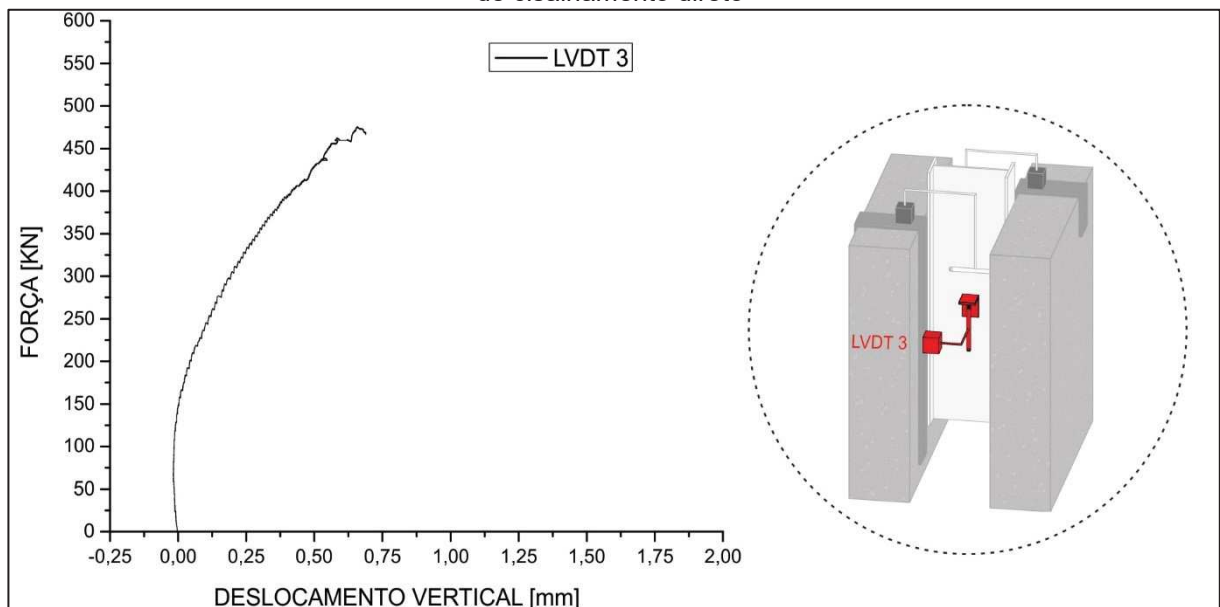
4.4.1 Deslocamento vertical do perfil metálico em relação à laje de concreto

O deslocamento vertical do perfil metálico em relação à laje de concreto obtido durante o ensaio de cisalhamento direto, pode ser observado na Figura 49. O deslocamento vertical máximo observado é de aproximadamente 0.66mm para uma carga de aproximadamente 476kN.

Como foi utilizado um material lubrificante no perfil metálico (como recomenda a norma) o atrito entre o perfil metálico e a laje de concreto diminuiu consideravelmente, sendo os conectores de cisalhamento os maiores responsáveis pela interação entre os materiais aço-concreto, garantindo a estrutura estabilidade e baixas deformações verticais.

Com base nos resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto e apresentados na Figura 49, pode-se classificar o conector de cisalhamento proposto neste estudo como rígido, uma vez que o mesmo não continuou a se deformar após atingir a resistência máxima. A principal característica do conector de cisalhamento rígido está na baixa deformação quando submetido a carregamentos, ocasionando ruptura frágil, referente ao esmagamento ou cisalhamento do concreto.

Figura 49 - Deslocamento vertical observado entre o perfil metálico e as lajes de concreto no ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Elaborado pelo autor.

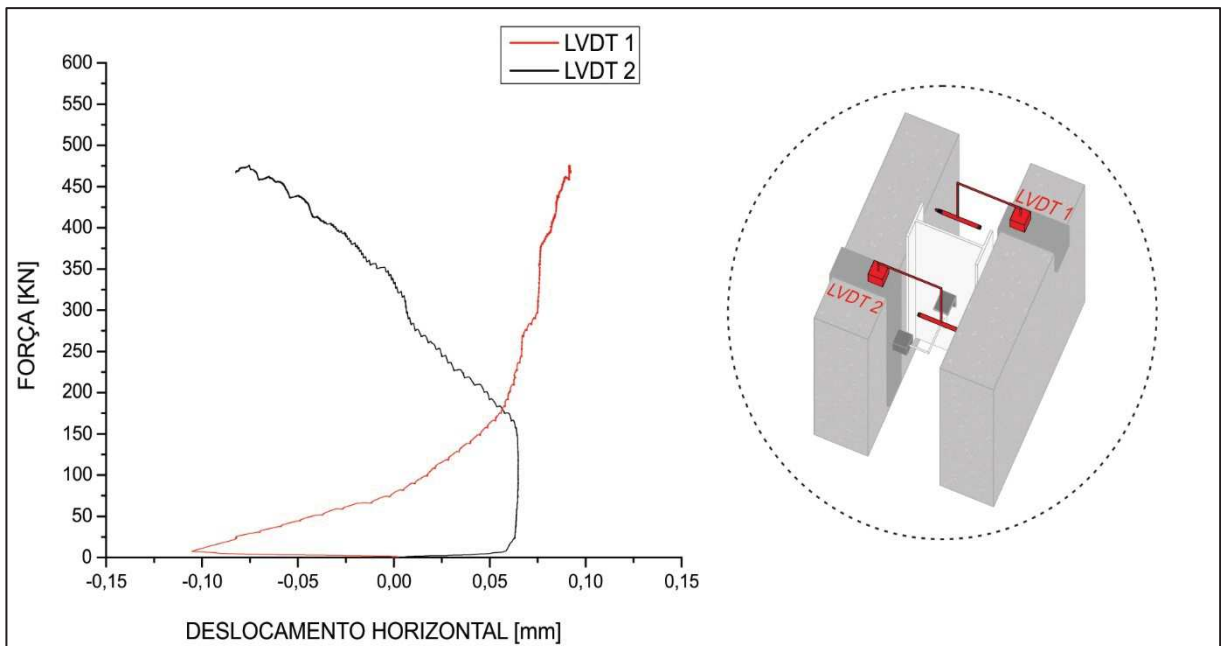
O deslocamento vertical baixo pode ainda ter ligação com o comportamento observado durante o ensaio de *push out*. Pôde-se perceber (visualmente) que uma das lajes cedeu mais que a outra durante a aplicação de carga e, como a instrumentação que media deslocamento vertical estava fixada exatamente nesta laje que deslocou mais, o LVDT 3 pode ter acompanhado o perfil, não realizando a medida exata do deslocamento.

4.4.2 Deslocamento horizontal das lajes de concreto

Como preconiza a Eurocode 4, da *European Committee for Standardization* (2004), o deslocamento transversal entre a laje de concreto e o perfil metálico foi verificado durante todo o ensaio, sendo o comportamento apresentado na Figura 50.

Como verificado no ensaio de flexão em viga mista, a separação entre o perfil de aço e a laje de concreto foi praticamente nula. Para o LVDT 1 o deslocamento verificado foi de aproximadamente 0,092mm, já para o LVDT 2 foi de aproximadamente -0,075mm. Levando-se em conta esses resultados percebe-se que o deslocamento foi quase nulo para as duas lajes.

Figura 50 - Deslocamento horizontal observado entre o perfil metálico e as lajes de concreto no ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Elaborado pelo autor.

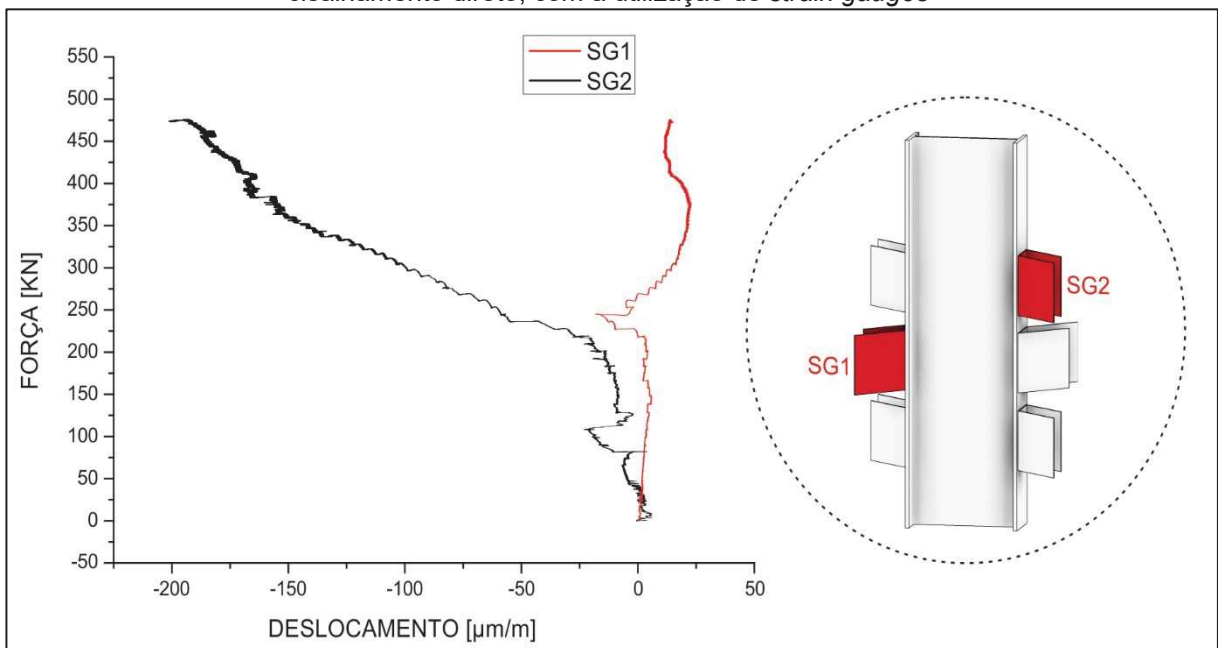
4.4.3 Microdeformações causadas nos conectores de cisalhamento submetidos ao ensaio cisalhamento direto

Os SG's foram utilizados para entender o comportamento do conector de cisalhamento proposto, quando submetidos às cargas do ensaio de cisalhamento direto (*push out*). Dessa forma, foi fixado um SG de cada lado, sendo os dois fixados em alturas diferentes.

Na Figura 51 percebe-se que o SG2 apresentou maiores deformações que o SG1. Durante o ensaio percebeu-se que o lado onde o SG2 estava fixado sofreu maiores deformações do que o lado oposto. Dessa forma, acredita-se que tais deformações causaram uma provável descompensação de cargas. Com a possível ruptura do lado que se deformou mais, o lado oposto foi mais solicitado, porém como o sistema ainda estava resistindo às cargas sua deformação foi menor. Já o lado que rompeu teve uma diminuição teórica das cargas, porém não resistia mais às solicitações, vindo a se deformar mais.

Mesmo com todas as conferências realizadas antes do início do ensaio para prevenir possíveis excentricidades de carga, este ainda pode ser um dos motivos para a maior solicitação de um dos lados.

Figura 51 - Microdeformação observada nos conectores de cisalhamento durante o ensaio de cisalhamento direto, com a utilização de *strain gauges*



Fonte: Elaborado pelo autor.

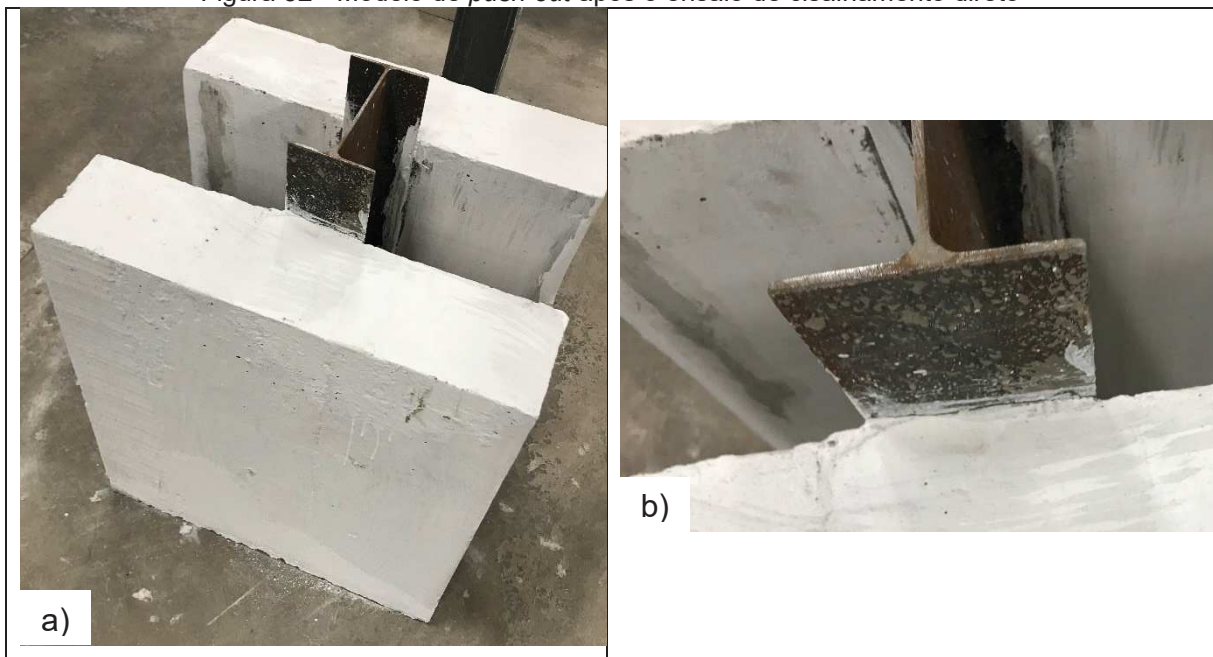
Uma terceira hipótese para as microdeformações terem apresentado valores diferentes tem ligação com a simetria dos conectores de cisalhamento, uma vez que a disposição dos mesmos não foi simétrica, como pode ser observado na Figura 32.

4.4.4 Avaliações pós-ensaio

Após a conclusão do ensaio, o modelo do *push out* foi analisado externamente para entender possíveis modos de falha, uma vez que a partir de cargas de aproximadamente 476kN, mesmo com a aplicação contínua de carregamentos, o sistema não absorvia mais as solicitações. Porém, como pode ser observado na Figura 52A, não houve fissuras visíveis a olho nu, mesmo com o modelo sendo pintado com cal branco para destacar possíveis falhas externas.

A única trinca observada no modelo ensaiado fica localizada na parte superior, entre o perfil metálico e a laje de concreto, e pode ser observada na Figura 52B.

Figura 52 - Modelo de *push out* após o ensaio de cisalhamento direto

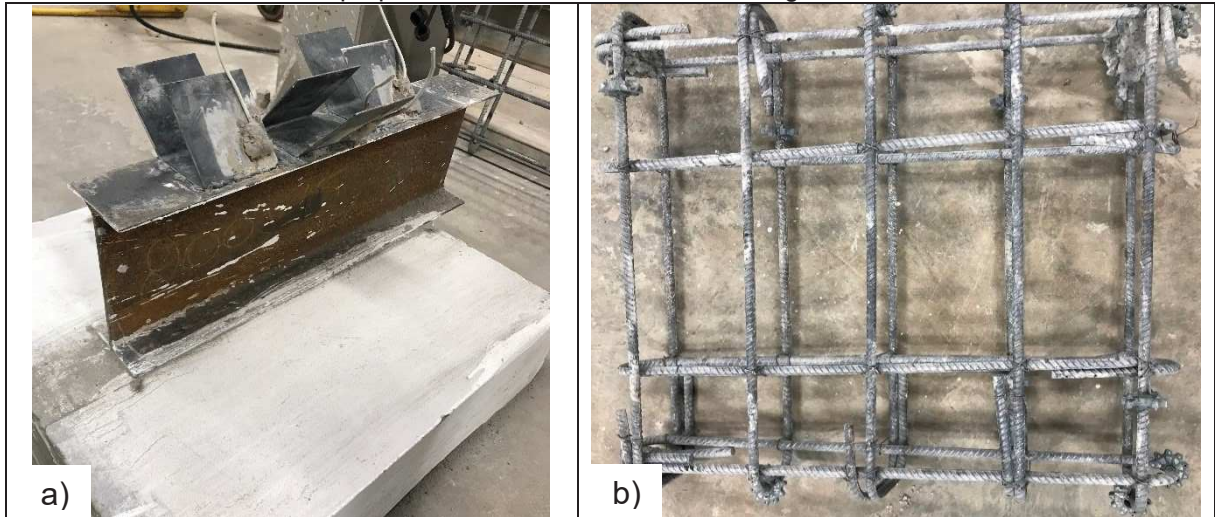


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, o modelo foi rompido para que fosse possível verificar o comportamento do conector quando submetido ao ensaio de cisalhamento direto. Utilizou-se o mesmo equipamento, usado para romper a laje de concreto no ensaio de flexão em viga mista.

Porém, como podem ser observados na Figura 53A, os conectores encontravam-se intactos, não apresentando nenhum tipo de fissura ou deformação visível aos olhos. A ferragem utilizada (Figura 53B) também não apresentou deformações/escoamentos, permanecendo íntegra durante todo o ensaio.

Figura 53 - Rompimento do modelo de push out e verificação do comportamento do conector de cisalhamento proposto, bem como da armadura longitudinal e transversal



Fonte: Elaborado pelo autor.

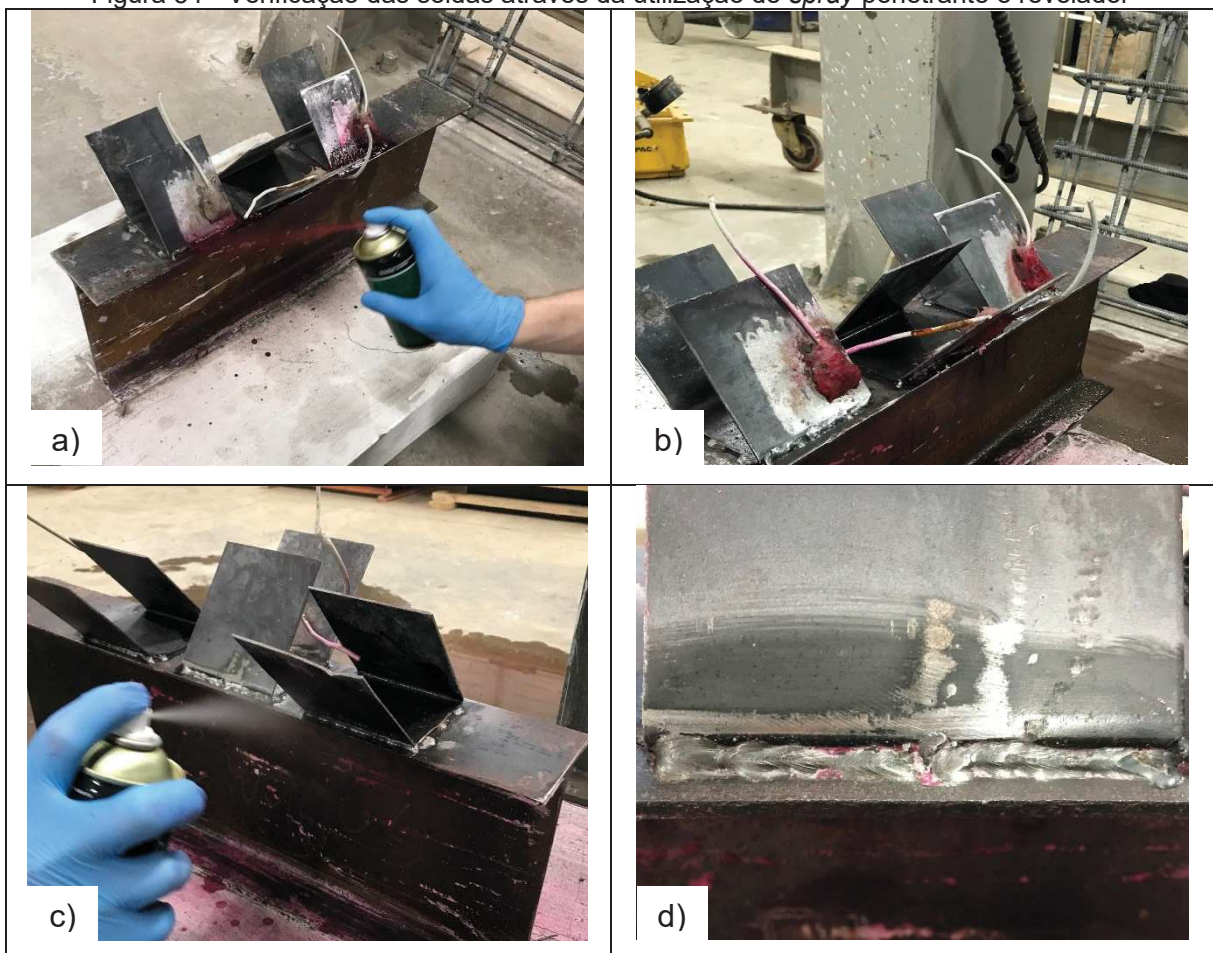
Durante o processo de rompimento percebeu-se que o concreto ao ser rompido gerava resíduos menores longe dos conectores e quanto mais próximo destes maiores ficavam os resíduos, podendo ser indicações de fissuras internas (aglutinações que podem caracterizar escoamento do concreto). Uma das hipóteses levantadas para a ruptura do sistema está ligada com o comportamento dos conectores rígidos, uma vez que o modo de falha mais comum para esta tipologia de conector é o esmagamento do concreto na interface de ligação dos dois materiais (aço-concreto).

Como o motivo de falha do sistema não estava claro, decidiu-se realizar uma verificação na solda dos conectores para averiguar se a mesma apresentava alguma microfissura. Assim sendo, foi utilizado *spray* penetrante para trincas em soldas da marca Carbografite, modelo PCG 53. Primeiramente, a superfície foi completamente limpa com água e sabão, até que não sobrasse nenhum vestígio de concreto nos conectores de cisalhamento. O *spray* foi então aplicado sobre os cordões de solda dos conectores (Figura 54A). Como recomenda o fabricante, aguardou-se um período de cinco minutos antes de realizar a limpeza do *spray*.

Com a superfície limpa e seca (Figura 54B) o segundo *spray* foi aplicado (Figura 54C). Utilizou-se *spray* revelador de trincas da marca Carbografite, modelo DCG S2.

Após o período de cinco minutos foi realizado a conferencia nos cordões de solda para encontrar possíveis fissuras causadas pelo ensaio de cisalhamento direto. Como pode ser observado na Figura 54D (no local onde existe manchas vermelhas) ocorreu fissuras/falhas, porém dificilmente as mesmas foram responsáveis por levar o modelo a ruptura durante o ensaio, tendo em vista a pequena quantidade e a localização das mesmas: entre a solda e o conector e entre o início e fim de dois cordões utilizados durante a soldagem.

Figura 54 - Verificação das soldas através da utilização de *spray* penetrante e revelador



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 VIABILIDADE ECONÔMICA

A Tabela 4 apresenta o custo para compra do kit do *stud bolt* (pino + anel) bem como a fixação com solda de eletrofusão. A dificuldade de encontrar empresas que

realizem tal atividade foi muito grande. A maioria das empresas contatadas relatou que quando precisam de tal serviço contratam prestadoras de serviço de outras cidades (geralmente do litoral de Santa Catarina), o que acresce ao custo da atividade os gastos com transporte e hospedagem da equipe responsável por desenvolver o serviço.

Tabela 4 - Custo para compra e fixação do conector normatizado pela NBR 8800

CONECTOR NORMATIZADO (<i>STUD BOLT</i>)				
Empresa	Valor do <i>Stud Bolt</i> (pino + anel)	Fixação (Eletrofusão)	Total	Cidade
A	R\$ 3,80	R\$ 12,00	R\$ 15,80	Chapecó (SC)
B	R\$ 3,75	R\$ 11,00	R\$ 14,75	Chapecó (SC)
C	R\$ 4,10	R\$ 11,50	R\$ 15,60	Chapecó (SC)
D	R\$ 4,25	R\$ 8,50	R\$ 12,75	São Miguel do Oeste (SC)
E	R\$ 3,50	R\$ 9,80	R\$ 13,30	Joinville (SC)
F	R\$ 4,15	R\$ 10,00	R\$ 14,15	São José (SC)
MÉDIA			R\$ 14,39	

Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor médio para compra e fixação do conector tipo *stud bolt*, entre as empresas que realizam a atividade, foi de R\$ 14,39.

O conector proposto possui um valor médio de produção de R\$ 2,90 cada. Neste valor consta: a chapa de 2mm, corte e dobra do material. Para a solda do elemento na estrutura, o valor gasto por elemento foi de R\$ 7,00. Dessa forma, o valor total para cada peça produzida bem como a fixação é de R\$ 9,90.

Analisando os dois valores de produção e fixação percebe-se que o conector proposto neste estudo possui valor 45,35% menor se comparado ao conector *stud bolt* (19x80mm).

5 CONCLUSÃO

Serão apresentadas nesse item final as principais percepções e aprendizados adquiridos durante o desenvolvimento do estudo em questão.

5.1 AQUISIÇÃO DE DADOS E INSTRUMENTAÇÃO PROPOSTA

Por meio dos ensaios realizados verificou-se que a instrumentação proposta neste estudo se mostrou eficiente, uma vez que foi possível coletar os dados que o estudo se dispôs a adquirir, sendo que os mesmos se mostram coerentes com os resultados de comportamento observados na literatura.

5.2 CONECTOR DE CISALHAMENTO PROPOSTO

Sobre o conector de cisalhamento proposto neste estudo e com base nos resultados obtidos com os ensaios de cisalhamento direto (*push out*) pôde-se classificar o conector quanto a ductilidade, sendo considerada rígida, uma vez que o mesmo não continuou a se deformar após atingir a resistência máxima e entrar no estado limite último. Os conectores rígidos possuem deformações muito pequenas quando submetidos a carregamentos, fazendo com que não apresentem problemas relacionados à fadiga, proporcionando uma conexão na interface aço-concreto livre de deslizamentos.

Outro ponto importante constatado sobre o conector de cisalhamento diz respeito ao comportamento estrutural. Quando o concreto da viga mista e do modelo de *push out* foi rompido, constatou-se que os mesmos ainda estavam intactos e sem grandes deformações, podendo-se assim afirmar que é possível a diminuição da espessura da chapa de aço-carbono utilizada (que o estudo propôs com 2mm), o que acarretaria em economia financeira.

Se comparado ao conector padrão *stud bolt*, normatizado pela NBR 8800, da Associação de Normas Técnicas (2008) os conectores tipo chapa possuem maior área de contato com a viga metálica, fazendo com que a tensão no concreto diminua, aumentando consideravelmente a resistência do sistema. Diferente do apresentado pelo conector padrão que possui área pequena de contato com a viga, sendo a concentração de tensão nesses pontos maiores.

5.3 ENSAIOS REALIZADOS

Para que uma estrutura seja considerada mista deve-se existir uma ligação na interface entre os elementos de aço e concreto que seja capaz de resistir aos fluxos cisalhantes gerados, permitindo que os dois materiais se deformem em conjunto como um único elemento. No ensaio de flexão em viga mista constatou-se que o conector cumpriu as duas principais funções a qual é designado: transmitir os esforços de cisalhamento longitudinal que ocorre entre o perfil de aço e a mesa de concreto e o de não permitir o deslocamento vertical na interface aço-concreto.

Confirmou-se com o ensaio de flexão que a viga mista foi submetida à interação total, tendo em vista que não houve deslocamento vertical diferencial entre a laje de concreto e a viga metálica. Desta forma, pode-se afirmar que no sistema misto houve a formação de apenas uma linha neutra, fazendo com que os materiais trabalhem em conjunto.

A viga mista ensaiada nesse estudo teve como causa principal de ruptura o esmagamento da mesa de concreto. Quando a laje começou a fissurar na parte inferior a linha neutra começou a se deslocar para cima diminuindo a área de resistência do concreto a compressão, causando dessa forma a ruptura já relatada. Sobre a ruptura do modelo de *push out*, acredita-se que o rompimento tenha ocorrido por esmagamento do concreto na interface aço-concreto, tendo em vista que esta é uma das formas mais comuns de falha de sistemas que utilizam conectores rígidos.

Outro fator muito importante relatado no ensaio de flexão diz respeito à utilização dos pilares metálicos que serviram como apoio para as vigas metálicas. Os mesmos resistiram durante o ensaio apresentando mínimas deformações (não houve flambagem) e ainda garantiram estabilidade à estrutura, uma vez que as vigas eram parafusadas, gerando um engaste parcial e impedindo movimentações em torno do eixo X e Y (este tipo de ligação é mais condizente com as ligações utilizadas em estruturas metálicas). Aliado a isso, a utilização dos enrijecedores sobre os apoios impediu possíveis torções e flambagens laterais que certamente ocorreriam caso a viga fosse simplesmente apoiada no pilar.

5.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

Em relação ao valor médio de produção do conector proposto, os valores se mostraram satisfatórios, tendo em vista a facilidade e baixa complexidade de produção e fixação dos mesmos sobre a mesa da viga metálica, apresentando economias de 45,35% se comparado ao conector padrão *stud bolt* (19x80mm).

Com a utilização do modelo proposto, qualquer empresa que trabalhe com estruturas metálicas e que realize solda do tipo MIG, poderia estar empregando o conector nos processos. Diferente dos dados encontrados para o *stud bolt*, tendo em vista que durante os contatos para cotação dos orçamentos muitas empresas relataram contratar companhias do litoral para realizarem essas atividades, juntando aos custos de fixação e de material o deslocamento da equipe que estaria desenvolvendo tal atividade.

5.5 CONCLUSÃO FINAL

Levando-se em consideração todos os aspectos mencionados, conclui-se que o elemento proposto neste estudo atende as exigências mínimas para ser utilizado, tendo em vista a facilidade de produção, o menor custo quando comparado ao conector *stud bolt* normatizado, além da real eficiência em manter o sistema misto com interação completa (eliminando o efeito de deslocamento relativo). Também mostra eficiência em transferir os fluxos cisalhantes gerados, permitindo que os dois materiais se deformem em conjunto como um único elemento.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade do estudo bem como a real confirmação da efetividade do conector de cisalhamento proposto, recomenda-se os seguintes estudos:

- Ensaio de flexão em viga mista e ensaio de cisalhamento no conector *stud bolt* para servir como base de comparação (utilizando os sistemas de apoio propostos neste estudo).
- Utilização de outras inclinações nas abas do conector proposto, para avaliar seu comportamento e resistência.
- Modelagem matemática do sistema por meio da utilização de elementos finitos, para validação do modelo proposto.
- Caracterização dos materiais para conseguir uma análise não linear.
- Utilizar na fabricação do conector proposto chapa de aço-carbono com espessuras menores.
- Trabalhar com modelo reduzido nos ensaios.

REFERÊNCIAS

ABBASS, M. M.; ADI, A. S.; KARKARE, B. S. Performance evaluation of shear stud connectors in composite beams with steel plate and RCC slab. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v. 4, n. 6, p. 586-591, out. 2011.

ALVES, A. R.; VALENTE, I. B.; VIEIRA, W. B.; VERÍSSIMO, G. S. Estudo experimental e numérico sobre o comportamento de vigas mistas com conector R96. In: CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA, 10., 2015, Coimbra. **Anais...** Coimbra: CMM, 2015.

_____.; _____.; _____.; _____. Avaliação do comportamento de vigas mistas com Conector crestbond. In: JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURA, 5., 2014, Lisboa. **Anais...** Lisboa: LNEC, 2014.

AMARAL, T. V.; OLIVEIRA, J. P. S.; CALENZANI, A. F. G.; TEIXEIRA, F. B. Flambagem lateral com distorção de vigas mistas de aço e concreto contínuas. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 4, p. 719-756, 2018.

ARRAYAGO, I.; FERRER, M.; MARIMON, F.; REAL, E.; MIRAMBELL, E. Experimental investigation on ferritic stainless steel composite slabs. **Engineering Structures**, v. 174, p. 538-547, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 5738**: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6649**: bobinas e chapas finas a frio de aço-carbono para uso estrutural: especificações. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7007**: aço carbono e aço microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7222**: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 14931**: execução de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ATAEI, A.; BRADFORD, M. A. Numerical study of deconstructable flush end plate composite joints to concrete-filled steel tubular columns. **Structures**, v. 8, n. 1, p. 130-143, 2016.

BALASUBRAMANIAN, R.; RAJARAM, B. Study on behavior of angle shear connector in steel-concrete composite structures. **International Journal of Steel Structures**, v. 16, n. 3, p. 807-811, 2016.

BARBOSA, W. C. de S.; CHATER, L.; CAVALCANTE, O. R. de O.; SILVA, A. S. Estudo numérico de conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas mistas de aço e concreto. In: IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 37., 2016, Brasília. **Anais...** Brasília: ABMEC, 2016.

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

_____; _____; _____; BARBOSA, W. C. S. Truss-type shear connector for composite steel-concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 757-767, 2018b.

BODE, H.; KUNZEL, R. Scherversuche zum tragverhalten eines neuartigen stahlverbundträgers mit schwalbenschwanzförmigen stegausnehmungen als verbundmittel. **Untersuchungsbericht**, v. 88, n. 2, 1988.

BRANDFORD, M. A.; OEHLERS, D. J. E. **Elementary behaviour of composite steel and concrete structural members**. 2. ed. San Diego: Butterworth Heinemann, 2002.

CAVALCANTE, O. R. O. **Estudo de conectores de cisalhamento do tipo 'V' em viga mista**. 2010. 216f. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

CHAPMAN, J. C. Composite construction in steel and concrete: the behaviour of composite beams. **The Structural Engineer**, v. 42, n. 4, p. 115-125, 1964.

CHAVES, I. A.; MALITE, M. Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 12, n. 56, p. 79-95, 2010.

_____. **Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido**. 2009. 138f. Dissertação (Mestrado em engenharia de estruturas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CHAVES, L. E. A. **Estudo de pilares de concreto armado e pilares mistos de aço e concreto totalmente revestidos**. 2013. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CHOI, W.; CHOI, Y.; YOO, S. W. Flexural design and analysis of composite beams with inverted-T steel girder with ultrahigh performance concrete slab. **Advances in Civil Engineering**, In press, 2018.

CLASSEN, M. Limitations on the use of partial shear connection in composite beams with steel T-sections and uniformly spaced rib shear connectors. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 142, p. 99-112, 2018.

COELHO, M. S.; MORILLA, J. C. Efeito da não linearidade na medição de extensômetros com ponte de Wheatstone. In: ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE SANTA CECILIA, 3., 2014, Santos. **Anais...** Santos: EPG, 2014.

DAVID, D. L. **Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas**. 2007. 250f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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

DALLY, J. W.; RILEY W. F. **Experimental Stress Analysis**. New York: McGraw-Hill, 1987.

DUTRA, C. M. Y. **Estudo do comportamento estrutural do conector crestbond considerando variações geométricas e mecânicas**. 2014. 182f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

EL-SAYED, K. M.; KHALIL, N. N.; EL BACKLESH, T. A. Flexural behavior of steel-concrete-steel sandwich slabs. **Advances in Research**, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2016.

EL-ZOHAIRY, A.; SALIM, H.; SHAABAN, H.; MUSTAFA, S.; EL-SHIHY, A. Experimental and FE parametric study on continuous steel-concrete composite beams strengthened with CFRP laminates. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 885-898, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-1**: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, general rules and rules for buildings. Bruxelas, 2004.

FABRIZZI, M. de A. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifício de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto**. 2007. 233f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FELDMANN, M.; GUNDEL, M.; KOPP, M.; HEGGER, J.; GALLWOSZUS, J.; HEINEMEYER, S. **New systems for composite bridges**: prefabricated composite girders of high strength materials and innovative shear connectors. Dusseldorf: Henrich Publikationen, 2014.

FIRMO, F.; JORDÃO, S.; NEVES, L. C.; BEDON, C. The effect of adhesive joints on the performance of hybrid steel-glass beams: an analytical and experimental study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ARCHITECTURAL AND STRUCTURAL APPLICATION OF GLASS, 6., 2016, Ghent. **Anais...** Ghent: CGC, 2016.

FREDDI, A.; OLMI, G.; CRISTOFOLINI, L. **Experimental stress analysis for materials and structures**: stress analysis models for developing design methodologies. Springer International Publishing, 2015.

GAJGA, J.; KURZ, W. Tragverhalten randnaher betondübel unter längsschubbeanspruchung. **Stahlbau**, v. 82, n. 9, p. 636-642, 2013.

GUADAGNINI, H. P.; ROCHA, F. S. da; BARLETTE, V. E. Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 5, n. 4, p. 753-762, 2011.

HASSANIEH, A.; VALIPOUR, H. R.; BRADFORD, M. A. Bolt shear connectors in grout pockets: finite element modelling and parametric study. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 179-192, 2018.

HENDERSON, I. E. J.; ZHU, X. Q.; UY, B.; MIRZA, O. D. Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams retrofitted with various bolted shear connectors. **Engineering Structures**, v. 131, p. 115-135, 2017.

_____; _____; _____; _____. Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors. **Engineering Structures**, v. 103, p. 298-307, 2015.

HOSSEINPOUR, E.; BAHAROM, S.; BADARUZZAMAN, W. H. W.; ZAND, A. W. A. Push-out test on the web opening shear connector for a slim-floor steel beam: experimental and analytical study. **Engineering Structures**, v. 163, p. 137-152, 2018.

HUO, J.; WANG, H.; ZHU, Z.; LIU, Y.; ZHONG, Q. Experimental study on impact behavior of stud shear connectors between concrete slab and steel beam. **Journal of Structural Engineering**, v. 144, n. 2, p. 1-12, 2018.

JURKIEWIEZ, B.; HOTTIER, J. M. Static behaviour of a steel-concrete composite beam with an innovative horizontal connection. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, p. 1286-1300, 2005.

KIM, S. H.; PARK, S.; KIM, K.S.; HAL, O. Influence of transverse rebar on shear behavior of Y-type perfobond rib shear connection. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 254-264, 2018.

_____; _____; _____; JUNG, C. Y. Generalized formulation for shear resistance on Y-type perfobond rib shear connectors. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 128, p. 245-260, 2017.

_____; _____; _____; HEO, W. H. Shear resistance characteristic and ductility of Y-type perfobond rib shear connector. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 108, p. 497-517, 2015.

_____; _____; _____; WOO, K. S. End-bearing resistance of Y-type perfobond rib according to rib width-height ratio. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 103, p. 101-116, 2014.

_____; _____; _____; CHOI, K. T. Experimental shear resistance evaluation of Y-type perfobond rib shear connector. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 82, p. 1-18, 2013.

KOPP, M.; WOLTERS, K.; CLABEN, M.; HEGGER, J.; GUNDEL, M.; GALLWOSZUS, J.; HEINEMEYER, S.; MARKUS, F. Composite dowels as shear connectors for composite beams: Background to the design concept for static loading. **Journal of Construction Steel Research**, v. 147, p. 488-503, 2018.

KOSTIC, S.; STOJONOVIC, B. D. Bending Resistance of Composite Sections with Nonductile Shear Connectors and Partial Shear Connection. **Advances in Civil Engineering**, In press, 2018.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas**: ênfase ao estudo da interface laje-viga. 2006. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LASHEEN, M.; SHAAT, A.; KHALIL, A. Numerical evaluation for the effective slab width of steel-concrete composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 148, p. 124-137, 2018.

LE, V. P. N.; BUI, D. V.; CHU, T. H. V.; KIM, I. T.; AHN, J. H.; DAO, D. K. Behavior of steel and concrete composite beams with a newly puzzle shape of crested rib shear connector: an experimental study. **Structural Engineering and Mechanics**, v. 60, n. 6, p. 1001-1019, 2016.

LEMES, I. J. M. **Estudo numérico avançado de estruturas de aço, concreto e mistas**. 2018. 208f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

_____; SILVA, A. R. D.; SILVEIRA, R. A. M.; ROCHA, P. A. S. Determinação da capacidade resistente de elementos estruturais mistos através do método da rótula plástica refinado. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 31, n. 4, out. 2015.

LEONHARDT, F.; ANDRA, W. ANDRA, H. P.; HARRE, W. Neues, vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbund-tragwerke mit hoher dauerfestigkeit. **Beton- und Stahlbetonbau**, v. 82, n. 12, p. 325-331, 1987.

LIU, X.; BRANDFORD, M. A.; CHEN, Q. J.; BAN, H. Finite element modelling of steel-concrete composite beams with high-strength friction-grip bolt shear connectors. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 108, p. 54-65, 2016.

LIU, Y.; GUO, L.; GU, B.; ZHANG, S. Experimental investigation on the flexural behavior of steel-concrete composite beams with U-shaped steel girders and angle connectors. **Engineering Structures**, v. 131, p. 492-502, 2017.

LOWE, D.; DAS, R.; CLIFTON, C. Characterization of the splitting behavior of steel-concrete composite beams with shear stud connection. In: EUROPEAN CONFERENCE ON FRACTURE, 20., 2014, Trondheim. **Anais...** Trondheim: NTNU, 2014.

MACHÁČEK, J.; STUDNICKA, J. Stahlbetonverbundträger mit perfobond-leiste. **Stahlbau**, v. 68, n. 1, p. 4-38, 1999.

MACHADO, R. T. **Análise da viabilidade econômica do projeto estrutural de edifícios de múltiplos andares com estrutura de aço**. 2012. 267f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MALITE, M. **Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios**. 1990. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

NIE, J.; FAN, J.; CAI, C. S. Stiffness and deflection of steel-concrete composite beams under negative bending. **Journal of Structural Engineering**, v. 130, n. 11, p. 1842-1851, nov. 2004.

OEHLERS, D. J. Splitting induced by shear connectors in composite beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 115, n. 2, p. 341-362, fev. 1989.

PANNONI, F. D.; SILVA, V. P. **Estruturas de aço para edifícios: aspectos tecnológicos e de concepção**. São Paulo: Blucher, 2010.

PARK, H.; BAEK, J.; HWANG, H.; EOM, T. Shear connector design of steel belt truss-to-concrete mega column connection. **ACI Structural Journal**, v. 114, p. 499-510, 2017.

PATHIRANA, S. W. P.; UY, B.; MIRZA, O.; ZHU, X. Strengthening of existing composite steel-concrete beams utilizing bolted shear connectors and welded studs. **Journal of Construction Steel Research**, v. 114, p. 417-430, 2015.

PEREIRA DA SILVA, H. **Simulação numérica do comportamento de conectores de cisalhamento tipo crestbond**. 2013. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PEREIRA, M. F.; BECK, A. T.; EL DEBS, A. L. H. C. Confiabilidade de pilares mistos aço-concreto parcialmente revestidos em flexo-compressão. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 2, p. 298-316, 2017.

PETRASCHEK, T. **Modelle zur vorhersage des tragvermögens eines kronendübels als alternativer schubverbinder**. 2008. 328f. Tese (Pós-Doutorado em Ciências Técnicas) - Universidade de Tecnologia de Viena, Viena, 2008.

PRAKASH, A.; ANANDAVALLI, N.; MADHESWARAN, C. K.; LAKSHMANAN, N. Modified push-out tests for determining shear strength and stiffness of HSS stud connector-experimental study. **International Journal of Composite Materials**, v. 2, n. 3, p. 22-31, 2012.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MARTINS, A. G. **Estruturas mistas**. 2. ed. Rio de Janeiro: CBCA, 2012.

ROCHA, F. S. da; GUADAGNINI, P. H. Projeto de um sensor de pressão manométrica para ensino de física em tempo real. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, p. 124-148, 2014.

RODRIGUES, M. C.; ANDRADE, S. A. L. de; LIMA, L. R. O. de; VELLASCO, P. C. G. da S.; RAMIRES, F. B. Experimental assessment of the composite joints shear connector component. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 132, p. 203-26, 2017.

SADEGHIAN, P.; HRISTOZOV, D.; WROBLEWSKI, L. Experimental and analytical behavior of sandwich composite beams: Comparison of natural and synthetic materials. **Journal of Sandwich Structures & Materials**, v. 20, n. 3, p. 287-307, 2018.

SANTIAGO, W. C. Monitoramento do comportamento de estruturas de concreto com extensômetros de resistência elétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURA, 3., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPE, 2010.

SALES, M. W. R.; PEREIRA JUNIOR, W. M.; FERREIRA, D. B.; MIKULASCHEK, A. Modelagem computacional do método de cisalhamento direto com conector tipo pino com cabeça. **Revista Eletrônica de Educação da Faculdade Araguaia**, v. 7, n. 1, p. 202-224, ago. 2015.

SEBASTIAN, W. M.; PIAZZA, M.; HARVEY, T.; WEBSTER, T. Forward and Reverse shear transfer in beech LVL-concrete composites with singly inclined coach screw connectors. **Engineering Structures**, v. 175, p. 231-244, 2018.

SEIDL, G.; VIEFHUES, E.; BERTHELLEMY, J.; MANGERIG, I.; WAGNER, R.; LORENC, W.; KOZUCH, M.; FRANSSSEN, J. M.; JANSSEN, D.; IKAHEIMONEN, J.; LUNDMARK, R.; HECHLER, O.; POPA, N. **Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission**. Luxembourg: European Union, 2013.

_____. **Behaviour and load bearing capacity of composite dowels in steel-concrete composite girders**. 2009. 232f. Tese (Pós-Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Wrocław, Breslávia, 2009.

SHARIATI, A.; SULONG, N. H. R.; SUHATRIL, M.; SHARIATI, M. Investigation of channel shear connectors for composite concrete and steel T-beam. **International Journal of Physical Sciences**, v. 7, n. 11, p. 1828-1831, 2012.

SILVA, A. R.; DIAS, L. E. Análise numérica do efeito da interação parcial na avaliação da largura efetiva de vigas mistas. **Revista Ibracon de Estruturas**, v. 11, n. 4, p. 757-778, 2018.

SIMÕES, Y. S.; ROCHA, F. M.; MUNAIAR NETO, J. Comparação numérica entre o comportamento termoestrutural de pilares de aço e mistos de aço e concreto parcialmente revestidos em situação de incêndio. **Revista Ibracon de Estruturas**, v. 11, n. 4, p. 876-901, 2018.

TAIG, G.; RANZI, G.; COSTA, D. D. da; PICCARDO, G.; LUONGO, A. A GBT model for the analysis of composite steel-concrete beams with partial shear interaction. **Structures**, v. 4, p. 27-37, out. 2015.

TAO, Z.; LI, W.; SHI, B.; HAN, L. Behaviour of bolted end-plate connections to concrete-filled steel columns. **Journal of Construction Steel Research**, v. 134, p. 194-208, 2017.

TITOUUM, M.; MAZOZ, A.; BENANANE, A.; OUINAS, D. Experimental study and finite element modelling of push-out tests on a new shear connector of I-shape. **Advanced Steel Construction**, v. 12, n. 4, p. 487-506, 2016.

THOMANN, M.; LEBET, J. P. A mechanical model for connections by adherence for steel-concrete composite beams. **Engineering Structures**, v. 30, p. 163-173, 2008.

TRAN, M. T.; DO, V. N. V.; NGUYEN, T. A. Behaviour of steel-concrete composite beams using bolts as shear connectors. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 143, p. 1-7, 2018.

TRISTÃO, G. A.; MUNAIAR NETO, J. Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 7, n. 23, p. 121-144, 2005.

VÁCLAVÍKOVÁ, V. Experimental verification of innovative shear connection of composite steel-concrete beams using push-out tests. **International Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, v. 1, p. 309-314, 2016.

VERÍSSIMO, G. S.; VALENTE, M. I. B.; PAES, J. L. R.; CRUZ, P. J. de S.; FAKURY, R. H. Projeto e análise experimental de um conector de cisalhamento em chapa de aço dentada para estruturas mistas de aço e concreto. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 3, n. 3, p. 53-67, 2007.

VIANNA, J. da C.; COSTA-NEVES, L. F.; VELLASCO, P. C. G. da; ANDRADE, S. A. L. Experimental assessment of Perfobond and T-Perfobond shear connectors' structural response. **Journal of Construction Steel Research**, v. 65, n. 2, p. 408-421, 2015.

VIEST, I. M. Review of research on composite steel-concrete beams. **American Society of Civil Engineers**, v. 86, n. 6, p. 1-21, 1961.

WANG, B.; HUANG, Q.; LIU, X.; LI, W. Experimental investigation of steel-concrete composite beams with different degrees of shear connection under monotonic and fatigue loads. **Advances in Structural Engineering**, v. 21, n. 2, 2018.

WANG, J.; XU, Q.; YAO, Y.; QI, J.; XIU, H. Static behavior of grouped large headed Stud-UHPC shear connectors in composite structures. **Composite Structures**, v. 171, p. 69-79, 2018.

YANG, Y.; CHEN, Y. Experimental study on mechanical behavior of PBL shear connectors. **Journal of Bridge Engineering**, v. 23, n. 9, p. 1-12, 2018.

YATIM, M. Y. M.; SHANMUGAM, N. E. Strain behaviour in composite plate girders with imperfect shear connection. **Jurnal Kejuruteraan**, v. 28, p. 37-52, 2016.

YOSSEF, M.; CHEN, A. A solution considering partial degree of composite action for insulated sandwich panels with general configuration flexible shear connectors. **Engineering Structures**, v. 162, p. 135-150, 2018.

ZAPFE, C. **Trag- und verformungsverhalten von verbundträgern mit betondübeln zur übertragung der längsschubkräfte**. 2001. 210f. Tese (Pós-Doutorado em Engenharia) - Universidade de Bundeswehr, Munique, 2001.