



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

JOSEANNE ALVES DE SOUSA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO UTILIZANDO
CONECTORES DE CISALHAMENTO TRELIÇADOS**

RUSSAS

2019

JOSEANNE ALVES DE SOUSA

MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO UTILIZANDO
CONECTORES DE CISALHAMENTO TRELICADOS

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

Orientador: Prof. Dr. Otávio Rangel de Oliveira
e Cavalcante

RUSSAS

2019

JOSEANNE ALVES DE SOUSA

MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO UTILIZANDO
CONECTORES DE CISALHAMENTO TRELIÇADOS

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

Aprovada em: 20/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Candido Jorge de Sousa Lobo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Ms. Camila Lima Maia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre ser força e luz para continuar nessa caminhada árdua da graduação e sempre se fazer presente em toda minha vida.

Aos meus pais, Virgina Alves e Josué Brechó, e a minha irmã, Vivianne Alves, por desde sempre serem exemplos de bondade e de compaixão e por terem sonhado comigo que este dia, enfim, chegaria.

A toda minha família, pelo incentivo e por não me deixarem esquecer, independentemente do quão longe eu vá, onde é meu lar.

As minhas “Mães-Madrinhas”, Cosma Brito, Docéo Freitas e Mazé Brito, por acreditar e confiar em mim e, sobretudo, por me apoiar nas minhas conquistas.

Ao meu avô, Luiz Gonzaga Brechó, *in memoriam*, por ter sido minha referência inicial para a Engenharia Civil.

Aos meus amigos e irmãos que deixei quando decidi cursar Engenharia Civil, por entenderem minhas faltas e atrasos, pela amizade e por se fazerem presentes mesmo à distância.

Aos meus amigos e irmãos que tive o prazer de encontrar na UFC-Campus Russas, pelos incontáveis momentos felizes, pelo apoio nos momentos tristes, por cada conversa e briga que tivemos, por todas aventuras e acasos, enfim, por me transformarem em alguém diferente da menina que chegou em 2015. Vocês são as melhores coisas que eu poderia levar dessa jornada, são parte da minha família.

A todos meus colegas de sala que contribuíram para minha formação em todas as discussões, trabalhos e conversas dessa caminhada.

Aos meus professores, que transmitiram conhecimento técnico e experiências pessoais e profissionais ao longo desses 5 anos. Em especial, professores Lindberg Gonçalves e Ernesto Pitombeira, pelos ensinamentos morais e éticos repassados.

Ao meu orientador, Otávio Rangel, pela confiança e paciência no desenvolvimento desse trabalho, e sobretudo pelos conhecimentos compartilhados.

Ao meu amigo, professor, orientador de pesquisa, conterrâneo e membro da banca de avaliação, Cândido Lobo, pelo empenho e disposição em ser a definição do que é ser um professor e por ter me dado a oportunidade de chama-lo, também, de amigo.

A professora Camila Lima, membro da banca avaliadora e também minha orientadora de estágio, pela disponibilidade, pelo tempo investido e pelas sugestões concedidas.

Por fim, a CR Duarte Engenharia Ltda. e todos os profissionais que tive a oportunidade de trabalhar, agradeço pela oportunidade de realizar meu estágio na empresa, pelos conhecimentos repassados, e sobretudo pelas risadas de momentos vividos.

RESUMO

A associação do aço com o concreto nas obras de engenharia permite um desempenho complementar das características dos dois materiais, possibilitando o gozo do potencial estrutural de cada material, desta forma, o aço resistindo aos esforços normais de tração e o concreto trabalhando os esforços de compressão. Contudo, para que este elemento composto se comporte, deveras, como uma viga mista é necessário um trabalho sincrônico entre o perfil de aço e a laje de concreto, por isso são utilizados elementos metálicos denominados conectores de cisalhamento. Os conectores objetivam restringir o deslizamento longitudinal e a separação vertical na interface aço-concreto. Desta forma, este trabalho tem o objetivo de elaborar modelos numéricos tridimensionais utilizando um *software* comercial com intuito de simular o comportamento estrutural da viga mista com conectores treliçados. A modelagem numérica consiste no desenvolvimento de um modelo reduzido com menor quantidade de elementos e tempo de processamento de dados que obtenha resultados satisfatórios comparados àqueles alusivos ao modelo completo para o ensaio de cisalhamento direto definido pela EN 1994-1-1:2011. Os resultados obtidos foram confrontados com valores experimentais e numéricos extraídos da literatura.

Palavras-chave: Estruturas mistas aço-concreto. Análise numérica. Conector de cisalhamento.

ABSTRACT

The association of steel with concrete in engineering works allows a complementary performance of the characteristics of two materials, enabling the enjoyment of the structural material potential of each material, thus, the steel resisting tensile normal stress and concrete resisting compression normal stress. However, for this composed element works, indeed, as a composite beam it is necessary a synchronous work between the steel profile and the concrete slab, so it is used metallic elements called shear connectors. The connectors aim to restrict the longitudinal slipping and the uplifting between steel beam and concrete slab. Thus, this work presents a three-dimensional numerical model using commercial software in order to simulate structural behavior of composite beams using truss connectors. The numerical model consists in the development of a reduced model with a smaller number of elements and the data processing time that gives satisfactory results compared to those allusive to the complete model for *push-out* tests defined by EN 1994-1-1: 2011. The results obtained were compared with experimental and numerical values extracted from the literature.

Keywords: Steel-concrete structures. Numerical analysis. Shear connector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ponte <i>Rock Rapids Bridge</i> , Iowa, E.U.A.	14
Figura 2.2 - Tipos usuais de conectores.	15
Figura 2.3 - Viga híbrida e viga mista sujeitas a Flexão.	18
Figura 2.4 - Forças resultantes numa seção mista.	21
Figura 2.5 - Tensão e deformação de uma viga mista para diferentes graus de conexão.....	21
Figura 2.6 - Distribuição das vigas mistas de acordo com a interação aço-concreto.	23
Figura 2.7 - Função dos conectores.	24
Figura 2.8 - Relação força-deslizamento nos conectores.	24
Figura 2.9 - Modelo do ensaio <i>push-out</i> com conectores de cisalhamento <i>stud bolt</i>	26
Figura 3.1 - Perfil metálico W 250x73 adotado para os ensaios <i>push-out</i>	28
Figura 3.2 - Posicionamento dos conectores de cisalhamento e das armaduras das lajes do modelo de conector tipo isósceles.	28
Figura 3.3 - Modelo numérico simplificado proposto.....	29
Figura 3.4 - Elemento C3D8R com numeração dos nós e ponto de integração.....	30
Figura 3.5 - Elemento B31 com numeração dos dois nós e ponto de integração.....	31
Figura 3.6 - Elementos do modelo de elementos finitos (modelo simplificado).....	31
Figura 3.7 - Conector de cisalhamento discretizado.....	32
Figura 3.8 - Discretização da laje de concreto e do perfil de aço.....	33
Figura 3.9 - Interface do sistema de edição de propriedade de contato, e restrição.....	34
Figura 3.10 - Superfícies master e slave.....	35
Figura 3.11 - Pares de contato <i>master-slave</i>	35
Figura 3.12 - Condições de contorno e aplicação de carga.....	36
Figura 3.13 - Sistema de aplicação de cargas e aquisição durante ensaio de cisalhamento direto.	37
Figura 3.14 - Comportamento do perfil metálico.	38
Figura 3.15 - Deformada apresentada pelo modelo com elementos sólidos.	39
Figura 4.1 - Pontos de referência para aquisição de deslocamentos.	40
Figura 4.2 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para conector treliçado isósceles de 10,0 mm.	41
Figura 4.3 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para conector treliçado isósceles de 12,5 mm.	42

Figura 4.4 - Mapa de fissuras das faces externas das lajes dos modelos I12,5	43
Figura 4.5 - Modelos em elementos finitos dos ensaios de <i>push-out</i> para os conectores treliçados utilizado como comparativo.	45
Figura 4.6 - Deslocamentos na direção do eixo x para perfis metálicos e conectores de cisalhamento.	46
Figura 4.7 - Gráfico de up-lift por carga aplicada para conector treliçado isósceles de 10,0 mm.	48
Figura 4.8 - Gráfico de up-lift por carga aplicada para conector treliçado isósceles de 12,5,0 mm.	48
Figura 4.9 - Distribuição de tensões equivalentes de Von Mises (kN/mm ²) no modelo numérico.	50
Figura 4.10 - Comparativo das deformada dos conectores de cisalhamento.....	52
Figura 4.11 - Distribuição de tensões equivalentes na direção XX (kN/mm ²) no modelo numérico de Ø10,0 para caga de 800kN.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas verificadas experimentalmente.	37
Tabela 4.1 - Deslizamento dos perfis metálicos por intensidade de carga com conectores de 10,0 mm.	43
Tabela 4.2 - Deslizamento dos perfis metálicos por intensidade de carga com conectores de 12,5 mm.	44
Tabela 4.3 - Up-lift da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 10,0 mm.	49
Tabela 4.4 - Up-lift da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 12,5 mm.	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Justificativa.....	11
1.2. Objetivos da pesquisa	12
<i>1.2.1. Objetivo geral.....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.2. Objetivos específicos</i>	<i>12</i>
1.3. Organização do trabalho.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Estado da arte.....	14
2.2. As vigas mistas	17
<i>2.2.1. Interface e aderência aço-concreto.....</i>	<i>18</i>
<i>2.2.2. Grau de conexão</i>	<i>20</i>
<i>2.2.3. Grau de interação</i>	<i>22</i>
2.3. Conectores de Cisalhamento.....	24
2.4. Ensaio de cisalhamento direto “push-out”.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Metodologia	27
3.2 Estudo de caso	28
3.3 Elementos finitos utilizados.....	29
<i>3.3.1 Elemento C3D8R.....</i>	<i>30</i>
<i>3.3.2 Elemento B31.....</i>	<i>30</i>
3.4 Definição da malha de elementos finitos.....	31
<i>3.4.1 Discretização do conector de cisalhamento</i>	<i>32</i>
<i>3.4.2 Discretização da laje de concreto</i>	<i>33</i>
<i>3.4.3 Discretização do perfil metálico</i>	<i>33</i>
3.5 Acoplamentos e vinculações	34

3.6	Aplicação de carga e condições de contorno	36
3.7	Propriedades dos materiais.....	37
3.8	Simulação com elemento sólido	38
4.	RESULTADOS.....	40
4.1.	Deslizamento longitudinal.....	41
4.2.	“Up-lift”	47
4.3.	Tensão de Mises	50
4.4.	Análise do conector de cisalhamento	52
4.4.1.	Conformação da deformada.....	52
4.4.2.	Conformação de tensões.....	53
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.1.	Conclusão.....	54
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

O uso de sistemas estruturais compostos como, por exemplo, lajes mistas aço-concreto (lajes de concreto com fôrma de aço incorporada, sistema *steel deck*), pilares mistos aço concreto (pilares de aço revestidos ou preenchidos com concreto) e vigas mistas de aço concreto (lajes de concreto sobre vigas de aço), tem se apresentado de forma intensa e com crescimento progressivo ao longo dos anos (KIRCHHOF *et al*, 2003).

A associação do aço com o concreto nas obras de engenharia permite um desempenho complementar das características dos dois materiais, possibilitando o gozo do potencial estrutural de cada material, desta forma, o aço resistindo aos esforços normais de tração e o concreto trabalhando os esforços de compressão. Nessa conjuntura, o aproveitamento positivo do potencial dos materiais permite uma estrutura resultante de elevada rigidez com menores dimensões se comparada a sistemas estruturais convencionais, possibilitando benefícios arquitetônicos e econômicos (BARBOSA, 2016).

Com relação às estruturas metálicas, os sistemas mistos apresentam vantagens como: redução do consumo de aço estrutural, maior rigidez da estrutura e diminuição das proteções demandadas de prevenção de incêndios e corrosão. Quanto as estruturas de concreto armado moldadas *in loco*, evidencia-se: melhoria da precisão dimensional da construção; aumento da velocidade produtiva de execução; possibilita a dispensa de escoras de fôrmas; e diminuição do peso próprio e volume da estrutura, impactando nos custos com fundações (BARBOSA, 2016).

As vigas mistas de aço concreto despontaram a partir da utilização de vigas de aço projetadas para suportar o peso da laje de concreto apoiada sobre a mesma. Mais tarde, a contribuição da laje de concreto passou a ser considerada, caracterizando um sistema misto. Contudo, para que este elemento composto se comporte, deveras, como uma viga mista é necessário um trabalho sincrônico entre o perfil de aço e a laje de concreto. Esta interação se dá por meio de forças longitudinais de cisalhamento manifestadas pelo atrito natural em materiais distintos e através de conectores de cisalhamento. Os conectores objetivam restringir o deslizamento longitudinal e a separação vertical na interface aço-concreto.

Inicialmente os estudos acerca de vigas mistas de aço e concreto foram por meio de modelos experimentais, muitas vezes dispendiosos. Entretanto, com o desenvolvimento das

tecnologias para análises numéricas, estudos de caráter numérico têm ocorrido com maior reiteração. *Softwares* baseados no Método dos Elementos Finitos permitem reproduzir numericamente o comportamento de uma estrutura, esquivando os dispêndios com modelos experimentais desde que bem calibrados a partir de resultados experimentais.

1.1. Justificativa

Atualmente, a norma ABNT NBR 8800:2008, intitulada “Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios” prever metodologias de dimensionamento para conectores tipo *stud bolt* e o conector U, os dois tipos mais amplamente utilizados no Brasil.

Os conectores tipo *stud bolt* apresentam desvantagens como: baixa resistência a fadiga e a necessidade de um gerador próprio de alta potência (225 kVA) a fim de alimentar a pistola utilizada na execução da solta, que compõe um sistema patenteado importado que encarecem sua utilização. Contudo *stud bolts* proporcionam alta produtividades na execução, ancoragem adequada e facilita a disposição de armaduras na laje. Os conectores tipo U, por sua vez, distribuem melhor as tensões devido a sua maior área de contato com a laje de concreto, além de possuir fácil fabricação por ser obtido através de perfis metálicos tipo U. Todavia, apresenta baixa produtividade na instalação e incompatibilidade com sistemas de lajes mistas com fôrmas incorporadas (BARBOSA, 2016).

Diante deste cenário, Barbosa (2016) propôs um conector tipo treliçado do tipo isósceles utilizando vergalhões de CA-50 como material constituinte. O conector proposto possui material constituinte facilmente encontrado no mercado e de preço acessível, e dispensa instalação e equipamentos específicos o que ocasiona na redução dos custos de instalação se comparado aos dois tipos supracitados.

Barbosa (2016) atestou, através de um modelo experimental oneroso e um modelo numérico robusto do ensaio de cisalhamento direto (*push-out*) normatizado pela EN 1994-1-1:2011, que estes conectores se apresentam como alternativa viável tecnicamente, pois possuem bom comportamento quanto à resistência aos deslocamentos longitudinais, ao *up-lift* e grandes valores de carga resistente ao cisalhamento. Além de apresentar comportamento dúctil e comportamento plástico ideal para deformações de ruptura. Em termos numéricos, os

conectores ensaiados de diâmetro 10,0 e 12,5 milímetros apresentam melhores resultados dentre os modelos testados.

Desta forma, a definição de uma estratégia de modelagem que reproduza satisfatoriamente o comportamento estrutural de vigas mistas utilizando conectores de cisalhamento treliçados servirá como subsídio para demais estudos acerca de outras situações, como por exemplo, vigas mistas em situação de incêndio, vigas mistas contínuas, entre outros.

A escolha pela simulação numérica dá-se pelo fato desta permitir uma análise detalhada do comportamento estrutural, sem os custos referentes a uma análise experimental e sem a necessidade de equacionamentos custosos, no entanto, necessita inicialmente, para calibração do modelo, resultados experimentais.

1.2. Objetivos da pesquisa

1.2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento e avaliação da acuracidade de um modelo numérico reduzido de vigas mistas aço-concreto utilizando conectores de cisalhamento treliçados, tipo isósceles, constituídos de vergalhões de aço CA-50.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Definição de geometria e parâmetros de restrição adequados para um modelo com um conector que represente o modelo completo (8 conectores) com acuracidade aceitável.
- Desenvolver modelo numérico com tempo de processamento baixo e não robusto, com malha de elementos finitos simplificada.
- Avaliar o comportamento do modelo proposto nas simulações numéricas baseadas do Método dos Elementos Finitos (MEF) através dos parâmetros: deslizamento longitudinal, “*up-lift*”, diagrama de tensões e deformada com valores extraídos do estudo desenvolvido por Barbosa (2016).

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho é composto de 5 capítulos, cujos conteúdos serão retratados sucintamente a seguir.

No capítulo 1 é apresentada a introdução sobre o tema de vigas mistas e conectores de cisalhamento utilizados nessas estruturas, com a justificativa que motivou o estudo do tema proposto seguindo pelos objetivos gerais e específicos do trabalho.

No capítulo 2 é abordado o estudo de vigas mistas aço-concreto tanto no contexto mundial quanto no Brasil, trata dos principais aspectos a respeito do comportamento estrutural de vigas mistas e dos conectores de cisalhamento, necessários para adequada compreensão deste trabalho.

No capítulo 3 são discorridos os aspectos referentes à modelagem numérica desenvolvida no *software* comercial, como elementos utilizados, definição de malha de elementos finitos, restrições e vinculações empregadas, condições de contorno e aplicação de carga e o modelo construtivo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados, as análises e os comentários obtidos além do comparativo com valores experimentais e numéricos extraídos da literatura.

No capítulo 5 são realizadas as conclusões finais do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os conhecimentos necessários para o entendimento dos conceitos utilizados elaboração deste trabalho. Descreve o estado da arte e os principais estudos desenvolvidos sobre o assunto. Trata dos conhecimentos gerais sobre as vigas mistas e elenca as principais características físicas de seu comportamento estrutural além de detalhar acerca dos conectores de cisalhamento. Por fim, retrata o procedimento o ensaio de *push-out*, utilizado para avaliar o modelo desenvolvido.

2.1. Estado da arte

Conforme Griffins (1994), em 1894 surgiram as primeiras estruturas mistas, nos Estados Unidos, com a construção de duas estruturas, uma ponte e um edifício, que utilizaram vigas metálicas revestidas de concreto com a finalidade de proteger a estrutura contra ação do fogo e da corrosão. Na figura 2.1, pode ser observada a ponte *Rock Rapids Bridge*, localizada em Rock Rapids, no Iowa, considerada uma das primeiras construções em estrutura mista.

Figura 2.1 - Ponte *Rock Rapids Bridge*, Iowa, E.U.A.



Fonte: Smith (2005)

Os primeiros estudos ainda não avaliavam a ação conjunta dos principais materiais, aço e concreto (BIANCHI, 2002). Lehtola (1992) afirma que somente quando os dispositivos de ligação entre os dois materiais, conectores de cisalhamento, foram concebidos é que a atuação interativa passou a ser considerada.

Em 1925, Scott, publicou resultados de ensaios em vigas mistas realizados pelo *National Physical Laboratory*. E já no ano seguinte, nos Estados Unidos, Kahn registrou uma

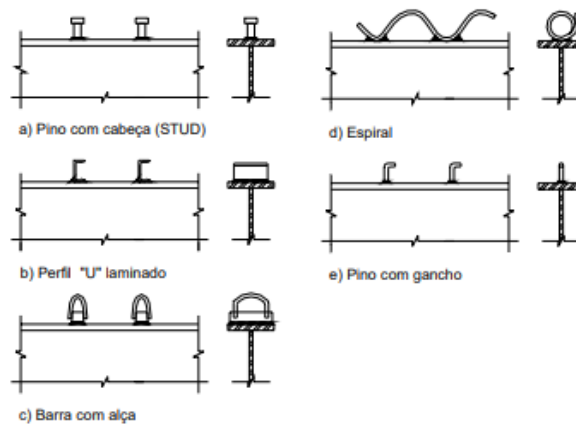
patente de um sistema de vigas mistas. Em 1929, Caughey e Scott publicaram um artigo sobre o dimensionamento de vigas de aço e lajes de concreto, onde foi primariamente citada a necessidade da existência de dispositivos para ligar os dois materiais, de forma a resistirem ao corte longitudinal e apresentaram também uma discussão da influência do escoramento na resistência e deformação das vigas.

Viest (1960), afirma que o primeiro estudo de conectores mecânicos se deu na Suíça em 1933, liderado pelo *Swiss Federal Institute for Testing Materials*, em parceria com o projeto chamado Sistema Alpha. Ainda segundo Viest (1992), o esquadrinhamento da interação laje de concreto e o perfil de aço foi intensificado, em 1936, com o projeto *Concrete Slab Investigation*, interessado na interação entre os materiais da seção composta.

Dando continuidade aos estudos acerca dos conectores, em 1943, na Universidade de Lehigh e Illinois, foram realizados ensaios experimentais tanto para conectores espirais como também para conectores formados por perfis laminados em forma de U, cantoneiras e seções H. Slutter e Driscoll (1965) apresentaram a equação empírica para o cálculo da resistência dos conectores U laminados e embutidos em concreto de densidade normal.

Durante as décadas de 1950 e 1960, pesquisadores europeus desenvolveram pesquisas com conectores nos formatos de gancho e rígidos formados por barras de aço retangulares e perfis laminados (MEIER-LEIBNITZ, 1941; MANNING, 1946; GRAF, 1951; *apud* VIEST, 1960). O tipo de conector mais utilizado atualmente, conector tipo pino com cabeça (*stud bolt*), começou a ser estudado em 1954 nas Universidades de Illinois e Lehigh (KOTINDA, 2006).

Figura 2.2 - Tipos usuais de conectores.



Na década de 1960 trabalhos de caráter experimental foram desenvolvidos majoritariamente utilizando conectores tipo pino com cabeça. Trabalhos como o de Chapman e Balakrishnam (1964) que descrevem o comportamento de dezessete vigas vistas, sob carregamento uniformemente distribuído aplicado no meio do vão, avaliando variação no número, na destruição na viga e na altura e diâmetros dos conectores. E o de Slutter e Driscoll (1965) que através da verificação da resistência última à flexão, foi desenvolvido um critério para determinação do número mínimo de conectores em vigas mistas.

No cenário mundial a sequência dos trabalhos desenvolvidos assumiu o viés de análises numéricas ao passo que os microcomputadores se desenvolviam. Inicialmente com Arizumi e Hamada (1980), seguido por Al-Amery e Roberts (1990), descrevendo a formulação de elementos finitos para a simulação do comportamento de vigas mistas aço-concreto. Já trabalhos mais recentes utilizam elementos finitos pré-estabelecidos, disponibilizados em códigos de cálculo mostrados por Baskar *et al* (2002) e Liang *et al* (2004), utilizando-se o ABAQUS, para análise de vigas mistas.

Segundo Veríssimo (2007), no Brasil a utilização de estruturas mistas ficou restrita a alguns poucos edifícios entre os anos 1950 e 1960, além de pequenas pontes. Nas últimas décadas, no entanto, a demanda por sistemas mistos tem aumentado substancialmente, em decorrência de vantagens construtivas e do desenvolvimento de novas tecnologias. Vários trabalhos de pesquisa sobre esse tema foram desenvolvidos no Brasil nos últimos anos, dentre eles destacam-se o de Malite (1990 e 1993); Verissimo (1996); Oliveira (2001); Kotinda (2006); Cavalcante (2010); Barbosa (2016).

Malite foi pioneiro na pesquisa deste assunto no Brasil em sua dissertação de mestrado em 1990, dando continuidade em seu doutorado em 1993, quando realizou ensaios com 3 tipos de conectores em chapa dobrada: cantoneira simples, cantoneira enrijecida e perfil U (MALITE, 1990; MALITE, 1992; *apud* KIRCHHOF, 2004).

Kotinda (2006) apresenta em seu trabalho modelos numéricos tridimensionais de vigas mistas visando simular o seu comportamento estrutural, principalmente no referente à interface entre viga de aço e laje de concreto. A análise é feita com conectores tipo pino com cabeça e foi utilizado o *software* ANSYS, tendo como base o Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos foram comparados com valores experimentais, extraídos de trabalhos apresentados por outros pesquisadores.

Cavalcante (2010) realizou um programa experimental que envolveu 16 ensaios de *push-out* a fim de confirmar as boas expectativas obtidas em análises numéricas realizadas através do Método dos Elementos Finitos para conectores do tipo concha com formato em V. Verificou-se aspectos de ductilidade, *up-lift*, fissuração do concreto, deformação e modos de colapso do conector proposto. Nos resultados o conector V proposto mostrou-se como alternativa de conector de cisalhamento para uso em vigas mistas de aço-concreto.

Barbosa (2016) elaborou um programa experimentas englobando 24 modelos, dentre conectores tipo *stud bolt* e treliçado retângulo ou isósceles, visando respaldar o desempenho dos conectores treliçados. Utilizou-se o *software* ANSYS durante a modelagem numérica. Foram verificados valores de ductilidade, *up-lift*, deslizamento longitudinal, fissuração do concreto, deformação e modos de colapso do conector proposto. Os resultados para os modelos treliçados se mostraram satisfatórios quando comparados ao tipo pino com cabeça.

2.2. As vigas mistas

Queiroz et al. (2012) define que sistema misto é àquele no qual um perfil de aço (laminado, soldado ou formado a frio) trabalha em conjunto com o concreto (geralmente armado), formando um pilar misto, uma viga mista, uma laje mista ou uma ligação mista.

Conforme Kotinda (2006), as vigas mistas consistem de um perfil de aço associado a uma laje de concreto, de maneira que estabeleça um desempenho solidário para resistir esforços de flexão. Alva e Malite (2005) complementam afirmando que a ligação é feita através de conectores de cisalhamento, cuja função é absorver os esforços cisalhantes manifestados entre os materiais e impossibilitar o afastamento vertical entre laje e perfil. A interação entre o concreto e o perfil de aço pode se dar por meios mecânicos (conectores, mossas, ressaltos etc.), por atrito (no caso de formas de aço com cantos reentrantes) ou, em alguns casos, por simples aderência e repartição de cargas (como pilares mistos sujeitos apenas a força normal de compressão).

Esse sistema procura dispor de maneira otimizada seus componentes utilizando: o concreto na compressão e o aço na tração. Nesta disposição, a necessidade do emprego de concreto na área tracionada é reduzida, minimizando seu uso quando comparado a uma

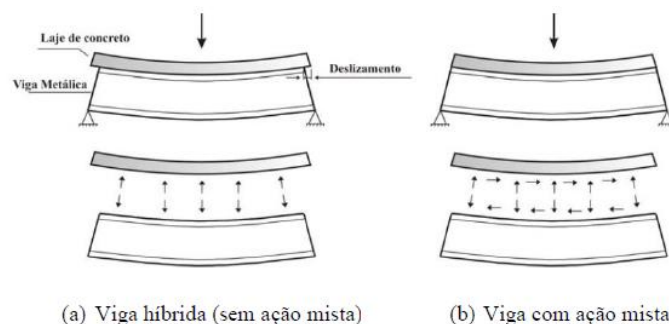
estrutura de concreto armado. Já quanto uma estrutura metálica, o perfil de aço necessário terá menor altura, tendo em conta que uma parcela do esforço é absorvida pelo concreto e por apresentar um arranjo mais rígido (VERÍSSIMO, 2007).

Em resumo, as vantagens dos sistemas mistos são bem conhecidas e advêm do fato de que o aço e o concreto, nesses sistemas, podem trabalhar à tração e à compressão, respectivamente, situação em que se obtém o melhor desempenho de ambos, conforme Veríssimo (2007).

2.2.1. *Interface e aderência aço-concreto*

Segundo Queiroz et al. (2012), quando não se utiliza conectores de cisalhamento na ligação entre os materiais, o deslizamento entre os elementos se dá de forma livre e a estrutura é chamada de híbrida, onde cada material se comporta de maneira diferente. Quando se há a utilização de conectores de cisalhamento, forças horizontais que tendem a encurtar a face inferior da laje e simultaneamente alongar a face superior da viga, isso faz com que o deslocamento relativo entre a interface aço-concreto não ocorra de maneira significativa. A Figura 1.3 abaixo mostra o comportamento da viga híbrida e da viga mista em um sistema formado por uma viga metálica e uma laje de concreto simplesmente apoiadas sob ação de cargas gravitacionais.

Figura 2.3 - Viga híbrida e viga mista sujeitas a Flexão.



Fonte: Queiroz et al (2012)

Chater (2015), cita ainda que além da força horizontal de cisalhamento desenvolvida na interface dos materiais, surge também uma força vertical no sentido de separar os componentes da estrutura. Esta força está presente mesmo quando não há a ação de viga

mista, isto é, quando a mesma é classificada como viga híbrida e não existem conectores mecânicos garantindo a interação entre a laje de concreto e a viga metálica. A este deslocamento vertical dá-se o nome de “*up-lift*”.

De modo geral, em estruturas mistas, a parte superior da laje sofre tensões de compressão e conseqüentemente se encurta, já a base da viga metálica sofre tensões de tração, alongando-se. Além do mais, os componentes desse sistema têm características geométricas e mecânicas distintas como o modo de elasticidade, o que faz com que ocorra um deslocamento relativo na região da interface aço-concreto. Quando os elementos estão ligados por meio de conectores de cisalhamento, com resistência suficiente para resistir o cisalhamento gerado na interface, os dois elementos propenderão a deformar com um elemento único.

A NBR 8800:2008 dita o dimensionamento da ligação entre aço e concreto em função do diagrama de esforços cortantes longitudinais por unidade de comprimento, denominado fluxo de cisalhamento longitudinal. A resultante é definida pela máxima força cortante transmitida pela ligação.

Embora exista uma resistência natural entre o aço e o concreto, além de forças de atrito que podem atingir valores elevados, normalmente essas parcelas de resistência não são consideradas no cálculo da capacidade resistente de um elemento estrutural misto, por apresentar um comportamento pouco previsível (VERISSIMO, 2007).

Ainda de acordo com Verissimo (2007), devido a isto, geralmente usa-se algumas técnicas nos ensaios de caracterização para eliminar a aderência entre o aço e o concreto, como a lubrificação da superfície de contato entre os dois materiais como traz a norma europeia EN 1994-1-1:2011 que trata do ensaio experimental de cisalhamento direto conhecido como *push-out*, a mesma exige que seja empregado graxa ou material similar na superfície de contato entre os materiais para que as leituras feitas no ensaio não captem nenhuma contribuição da aderência entre o aço e o concreto. Caso contrário, seria difícil diferenciar qual parcela da resistência ao cisalhamento se deve a aderência natural e qual parcela é proveniente do conector.

Babosa (2016) salienta que o comportamento de uma ligação mista é complexo, sendo assim necessário compreender dois conceitos importantes que surgem da interação entre os dois materiais distintos, sendo eles: grau de conexão, que trata da resistência estrutural da conexão e o grau de interação, que trata da resistência ao deslizamento da mesma.

2.2.2. Grau de conexão

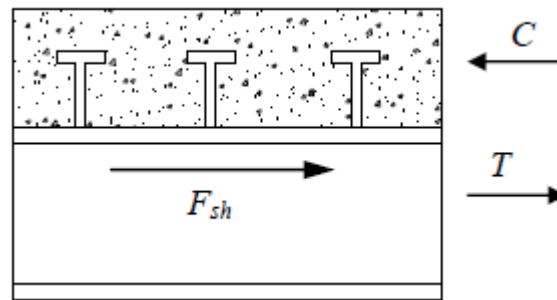
O estado limite de utilização ou de serviço (ELS) é caracterizado pela impossibilidade do emprego saudável da estrutura, por não oferecer as condições necessárias para garantir a aparência, conforto do usuário, desempenho e boa durabilidade, mesmo não se tendo esgotado a capacidade resistente da estrutura (FERNANDES, 1996). A verificação de flechas excessivas, fissuração exagerada do concreto e a presença de fortes vibrações na estrutura são alguns dos sintomas de que a estrutura atingiu o seu estado limite de serviço.

Cavalcante (2010) afirma que o grau de conexão se refere a resistência estrutural da laje e do perfil metálico que compõe a viga mista, e a respectiva ligação entre esses elementos. E afirma ainda que a distribuição das tensões normais em uma viga mista está diretamente relacionada ao grau de conexão da estrutura, que pode ser classificado como total ou parcial.

De acordo com Chater (2015), a viga tem grau de conexão máximo, ou seja, total, quando a sua resistência independe dos conectores, ficando assim relacionada as deformações máximas do concreto e do aço em sua seção transversal mais solicitada. Uma conexão completa se verifica quando se tem uma quantidade de conectores, tal que qualquer aumento no número ou na resistência desses conectores não implica em aumento da resistência á flexão da viga mista (TRISTÃO, 2002).

Ainda segundo Cavalcante (2010), o equilíbrio dos esforços na seção de uma viga mista depende da resistência a compressão da laje (C), e a tração da viga metálica (T), bem como, da ligação entre esses dois materiais (Fsh), que é definida pelos conectores de cisalhamento. A resistência a força horizontal de cisalhamento (Fsh), é obtida através da soma entre as resistências individuais dos conectores. A figura 1.4 ilustra o esquema representativo de forças atuantes.

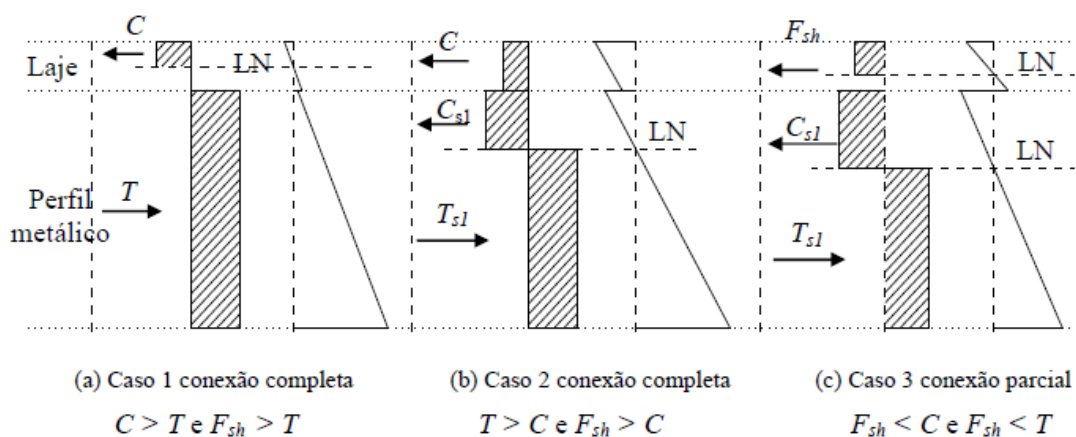
Figura 2.4 - Forças resultantes numa seção mista.



Fonte: Cavalcante (2010)

Oehlers e Bradford (1995) trazem três casos possíveis de grau de conexão relativos à distribuição das tensões na seção de uma viga mista (Figura 2.5), sendo dois deles de conexão total e um de parcial. Os dois primeiros casos, mostram a diferença entre a distribuição de tensões na viga quando se tem uma resistência ao escoamento da seção bruta menor que a resistência a compressão do concreto, fazendo com que a linha neutra (LN) se encontre na laje de concreto (Figura 2.5a), já no segundo caso, ocorre o inverso e a linha neutra (LN) localiza-se no perfil metálico (Figura 2.5b). No terceiro caso (Figura 2.5c) a resistência da conexão é menor que a resistência a compressão do concreto e a resistência a tração do aço, limitando assim a contribuição da resistência da laje e fazendo com que apareçam duas linhas neutras distintas devido a conexão ser parcial.

Figura 2.5 - Tensão e deformação de uma viga mista para diferentes graus de conexão.



Fonte: Adaptado de Oehlers e Bradford (1995)

No dimensionamento de uma viga mista, é comum determinar a resistência mínima dos conectores para que se atinja a conexão total, determinando-se a quantidade e a dimensão

dos conectores, e em seguida, realizar os cálculos ignorando a contribuição dos mesmos (CHATER, 2015).

Pela norma ABNT NBR 8800:2008, o grau de conexão (chamado de grau de interação na norma) total é obtido quando se tem $\eta_i = 1$ e é parcial para valores entre 0 e 1. Na norma o grau de conexão (η) é definido, no item O.2.3.1.1.2, através da equação 2.1:

$$\eta_i = \frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde:

η_i : Grau de conexão de cisalhamento;

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

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

2.2.3. Grau de interação

De acordo com Barbosa (2016), o grau de interação está relacionado ao deslocamento relativo entre a laje de concreto e o perfil metálico da viga mista. Desse modo, se o grau de interação em uma viga é nulo, tem-se uma estrutura híbrida e não mista.

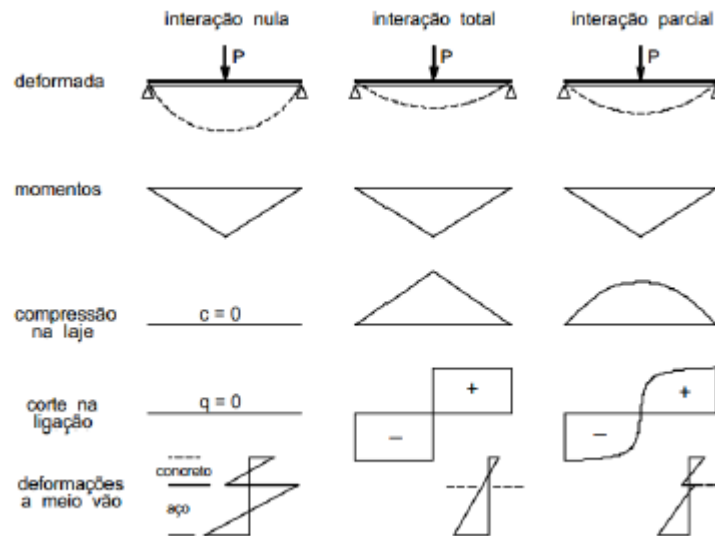
Quando não há deslizamento algum entre os elementos que compõe a estrutura, tem-se um grau de conexão máximo, ou seja, total, isso aconteceria no caso de conectores de cisalhamento com rigidez infinita como cita ainda Barbosa (2016). Neste caso a viga apresentaria somente uma linha neutra (LN) e o comportamento totalmente solidário entre o perfil e a laje, admitindo-se a hipótese de Navier-Bernoulli onde as seções planas permaneceriam planas ao longo de toda a peça.

Segundo Cavalcante (2010), o grau de interação parcial representa um meio termo, onde observa-se um deslocamento entre os componentes da estrutura, proveniente das deformações sofridas pelos conectores de cisalhamento. Apesar deste pequeno deslocamento,

o perfil metálico e a laje de concreto permanecem solidários tendo seus materiais trabalhando em conjunto apesar da existência de duas linhas neutras neste caso, tendo cada material a responsabilidade de absorver parte dos esforços.

A figura 2.6 representa os diagramas representativos de cada tipo de interação entre os elementos.

Figura 2.6 - Distribuição das vigas mistas de acordo com a interação aço-concreto.



Fonte: Malite (1990)

Oehlers et al (1997) apud Chater (2015), assumem de maneira simplificada que o comportamento do perfil e da laje é elástico, e dos conectores é plástico, chegando assim analiticamente a uma expressão do grau de interação entre o aço e o concreto que dependem das rigidezes do perfil de aço, da laje de concreto e do conector de cisalhamento (Eq. 2.2).

$$\varphi = \frac{Psh_{m\acute{a}x}}{Psh_{m\acute{a}x}, fi} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

onde:

φ : Grau de interação entre a laje de concreto e o perfil metálico;

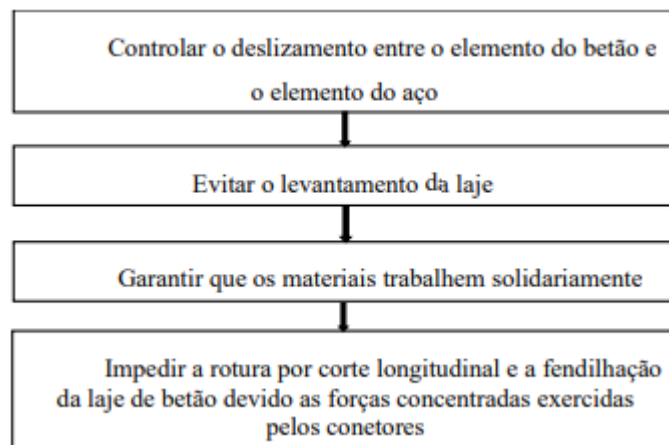
$Psh_{m\acute{a}x}$: Força resistente dos conectores de cisalhamento no ponto de momento fletor máximo;

$Psh_{m\acute{a}x}, fi$: Força resistente dos conectores de cisalhamento no ponto de momento fletor máximo necessária para anular o deslocamento entre o aço e o concreto.

2.3. Conectores de Cisalhamento

Segundo Pfeil (2009), os conectores de cisalhamento são dispositivos mecânicos que tem a função de garantir o trabalho conjunto da seção de aço com a laje de concreto. A figura 2.7 apresenta as principais funções dos conectores segundo a Norma Europeia EN 1994-1-1:2011.

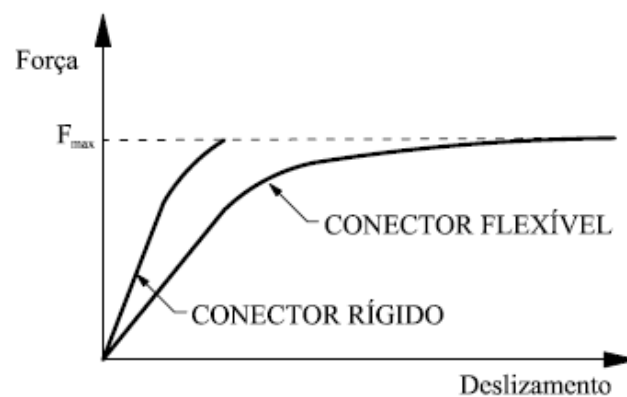
Figura 2.7 - Função dos conectores.



Fonte: EN 1994-1-1,6.6 (2011)

Os conectores de cisalhamento podem ser classificados em rígidos ou flexíveis (ALVA, 2000). Essa classificação é determinada de acordo com a resposta do conector a ação do fluxo de cisalhamento longitudinal desenvolvido pela ação conjunta entre a laje de concreto e o perfil metálico da estrutura mista. Esse comportamento é exemplificado pela relação entre a força no conector e o deslizamento entre a laje e o perfil de aço (Figura 2.8).

Figura 2.8 - Relação força-deslizamento nos conectores.



Fonte: Alva (2000)

O conector flexível, apesar de apresentar ruptura dúctil, o que é desejável, tem baixo desempenho quando solicitado à fadiga, pois se deforma muito com a variação cíclica de carga, diferentemente do conector rígido. O conector do tipo *stud bolt*, por exemplo, é flexível e tem baixa resistência à fadiga, se deformando até mesmo para cargas de serviço. O conector ideal apresentaria comportamento rígido sob cargas de serviço e flexível para as cargas dos Estados Limites Últimos (VERÍSSIMO, 2007).

O comportamento dúctil, segundo Tristão (2002), é caracterizado pela redistribuição do fluxo longitudinal de cisalhamento, de tal forma que, sob um carregamento crescente, o conector continua se deformando, sem romper, mesmo quando próximo a sua resistência máxima. Nesse caso, pode-se admitir um espaçamento igual entre os conectores, garantindo uma otimização na execução da estrutura mista. Desta forma, o colapso de uma viga mista devido a ruptura da ligação aço-concreto será também dúctil.

A norma Europeia EN 1994-1-1:2011 traz uma definição de ductilidade baseada no deslizamento característico δ_{uk} obtido do ensaio de *push-out* padronizado também pela mesma e que através deste é possível medir o deslizamento relativo entre o perfil de aço e a laje de concreto, dessa forma, é possível a construção do gráfico força x deslizamento e a análise da ductilidade e resistência dos conectores.

O conector de cisalhamento mais largamente utilizado em vigas mistas é o *stud bolt*, com os critérios de dimensionamento apresentados na ABNT NBR 8800:2008, que mostra também a metodologia de dimensionamento de conectores do tipo “U” para estruturas mistas de aço e concreto. No decorrer do tempo vários conectores de cisalhamento foram desenvolvidos com o intuito de aprimorar a interação entre aço e concreto das estruturas mistas. Como é o caso do conector do tipo *Crestbond*, derivado do conector *Perforbond* e avaliado experimentalmente por Veríssimo (2007), do conector de cisalhamento do tipo “V”, desenvolvido e avaliado experimentalmente por Cavalcante (2010) e dos conectores treliçados ensaiados e avaliados por Barbosa (2016).

2.4. Ensaio de cisalhamento direto “push-out”

As vigas mistas são constituídas pela associação de vigas de aço com a laje de concreto por meio de conectores de cisalhamento, elas apresentam vantagens estruturais nas

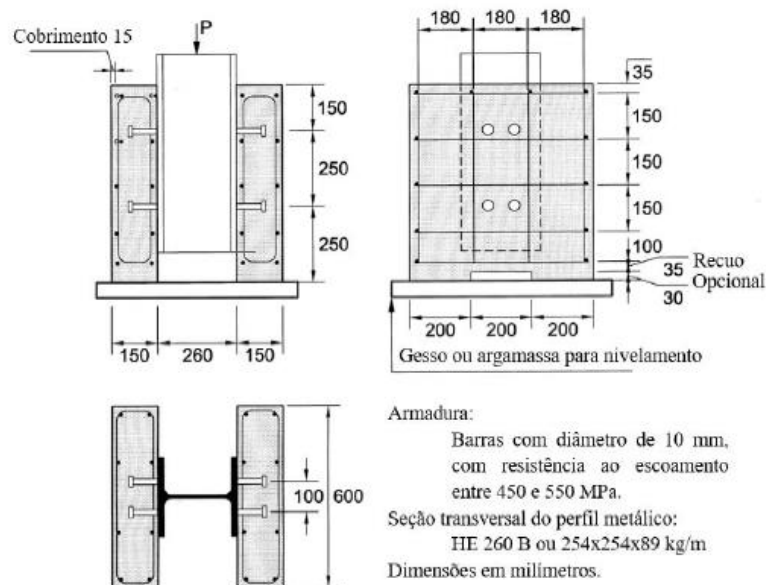
regiões de momento positivo, em comparação com as vigas metálicas isoladas, segundo Alva e Malite (2005).

Como consta na Norma Europeia EN 1994-1-1:2011 o ensaio *push-out* consiste na aplicação de cargas através um atuador hidráulico em um perfil metálico ligado a duas lajes de concreto armado de dimensões 600x650x150 milímetro presas por meio de conectores de cisalhamento instalados no perfil (Figura 2.9). Durante o ensaio, é empregado uma caga “P” no perfil, permitindo verificar o desempenho do conector.

Através desse ensaio é possível avaliar o deslocamento longitudinal relativo entre a laje de concreto e o perfil metálico, o deslocamento transversal das lajes em relação ao perfil, conhecido como *up-lift*, a progressão da carga durante o ensaio e o comportamento dos conectores e das lajes de concreto durante a após os ensaios.

A Figura 2.9 traz o esquema de realização do ensaio de *push-out*, no qual se encontram detalhes das disposições de armadura e conectores, além das medidas adotadas para os elementos.

Figura 2.9 - Modelo do ensaio *push-out* com conectores de cisalhamento *stud bolt*.



Fonte: EN 1994-1-1 (2011)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios experimentais são fundamentais para análise e compreensão de comportamentos estruturais. Quanto a conectores de cisalhamento, os ensaios são de grande relevância na validação e melhoria da metodologia teórica de cálculo de resistência e ductibilidade. No entanto, pode apresentar limitações tanto em resultados obtidos em pontos específicos dos modelos quanto ao custo elevado da construção de modelos e ensaios de laboratório. Gattesco (1999) e Oven et al (1997) já mostraram anteriormente modelos matemáticos, através de equacionamentos custosos devido à complexidade da análise multiaxial de tensões e deformações, o comportamento estrutural de vigas mistas. Neste contexto, a simulação numérica, quando calibrada, apresenta-se como ferramenta para uma análise detalhada de elementos mistos.

A modelagem numérica realizada através do *software* utilizado, versão 6.14-1, elaborado com base no Método dos Elementos Finitos, constitui-se da simulação do comportamento estrutural dos ensaios de *push-out*, normatizado pela EN 1994-1-1:2011, realizados e publicados por Barbosa (2016). Os tópicos seguintes tratam do estudo de caso estudado e dos parâmetros utilizados para o desenvolvimento do modelo numérico proposto.

3.1 Metodologia

A pesquisa se baseia no desenvolvimento de um estudo numérico, através do programa comercial escolhido, com um modelo simplificado que simule o comportamento dos conectores de cisalhamento treliçados durante realização de ensaios de cisalhamento direto, *push-out*, de acordo com as prescrições da norma europeia EN 1994-1:2011.

A validação da estratégia de modelagem adotada foi realizada por meio de comparação entre os resultados obtidos numericamente e os resultados experimentais e numéricos extraídos de Barbosa (2016). Os parâmetros avaliados foram: deslizamento longitudinal, afastamento vertical (*up-lift*) e deformação do conector.

Em resumo, a pesquisa possui classificação quando abordagem quantitativa e de natureza aplicada. Verifica objetivos descritivos ao tratar dos procedimentos de estudo de caso.

3.2 Estudo de caso

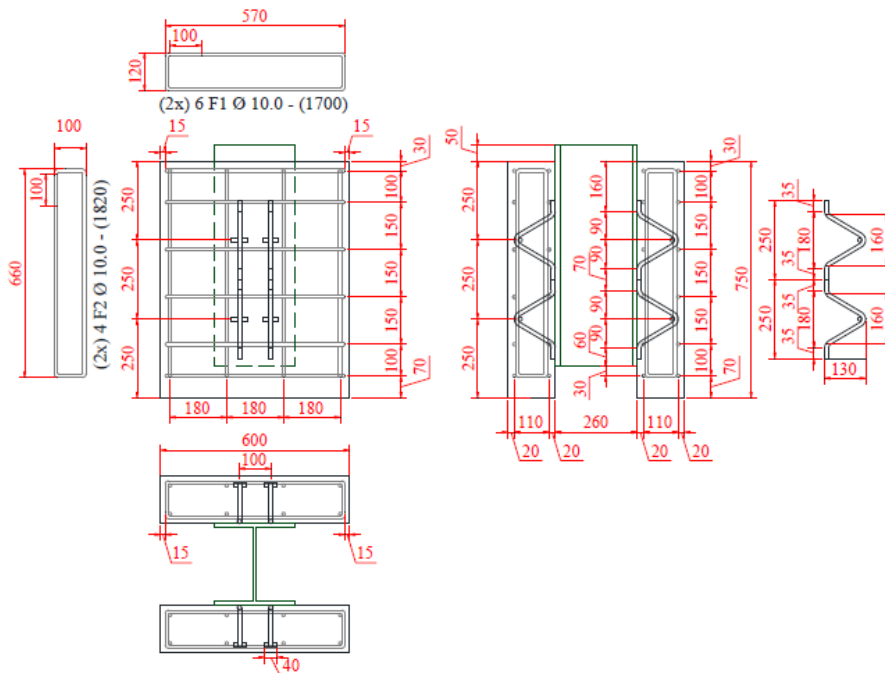
Os modelos numéricos apresentados neste trabalho foram desenvolvidos em concordância com os ensaios experimentais descritos em Barbosa (2016), figuras 3.1 e 3.2, referentes ao ensaio de cisalhamento direto (*push-out*). Barbosa (2016) ensaiou 3 modelos experimentais com os conectores: *stud bolt*, treliçado retângulo e treliçado isósceles. Os conectores do tipo treliçado isósceles com 10,0 e 12,5 milímetros de diâmetro obtiveram os melhores resultados quando os aspectos avaliados, de forma que estes serão os modelos idealizados nesta pesquisa.

Figura 3.1 - Perfil metálico W 250x73 adotado para os ensaios *push-out*.

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

Fonte: Barbosa (2016)

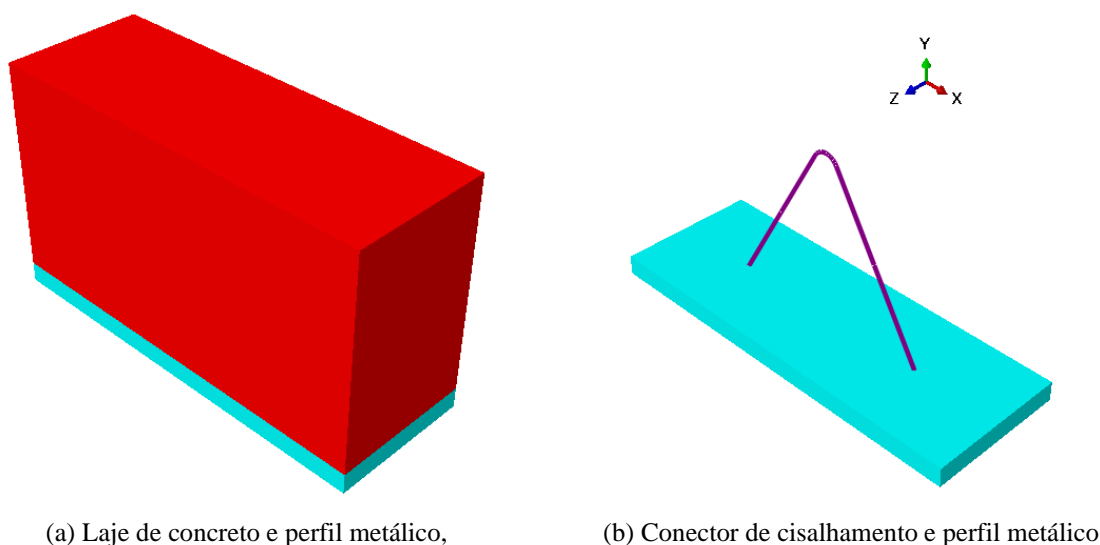
Figura 3.2 - Posicionamento dos conectores de cisalhamento e das armaduras das lajes do modelo de conector tipo isósceles.



Fonte: Barbosa (2016)

No ensaio de cisalhamento direto, os modelos são construídos com 8 conectores dispostos a cada dois e em fila, de forma simétrica em relação ao plano perpendicular a alma da viga metálica. A fim de minimizar o tempo de processamento da simulação e devido as condições de simetria do modelo, optou-se pela concepção de um modelo simplificado com apenas 1 (um) conector, representado na figura 3.3, que simula uma faixa da laje de 280x150x100 milímetros, a faixa correspondente da mesa do perfil metálico e um conector treliçado isósceles.

Figura 3.3 - Modelo numérico simplificado proposto



Fonte: Autor (2019)

3.3 Elementos finitos utilizados

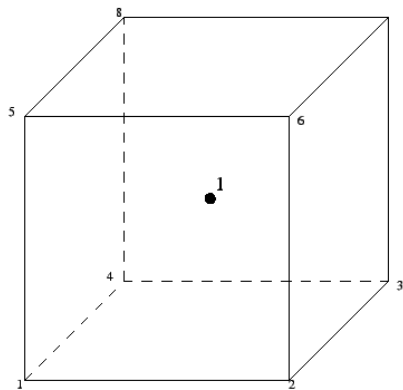
Os modelos numéricos desenvolvidos foram elaborados utilizando elementos pré-definidos, disponibilizados pela biblioteca do *software* utilizado na simulação. A escolha dos elementos sólidos utilizados foi feita levando-se em consideração: graus de liberdade, esforço computacional demandado, família que o elemento pertence, número de nós e, principalmente, o comportamento a ser simulado.

Nos modelos desenvolvidos foram utilizados elementos sólidos no perfil metálico e na laje de concreto e elementos de viga para os conectores de cisalhamento.

3.3.1 Elemento C3D8R

O elemento C3D8R é um elemento linear de uso geral, com integração em 1 (um) ponto. Possui 8 (oito) nós, cada um com 3 (três) graus de liberdade, referentes às translações segundo os eixos x, y, e z. A numeração dos nós e o ponto de integração segue a convenção da representada na figura 3.4.

Figura 3.4 - Elemento C3D8R com numeração dos nós e ponto de integração.



Fonte: SIMULIA (2009)

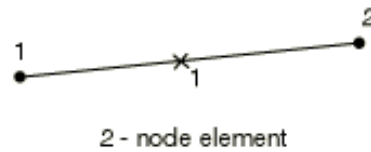
O elemento em questão foi utilizado para discretizar o perfil de aço e a laje de concreto na simulação. A decisão por um elemento sólido foi feita devido o objetivo deste trabalho de simular as concentrações de tensões junto aos conectores de cisalhamento.

3.3.2 Elemento B31

O elemento B31 (Figura 3.5) foi utilizado na modelagem dos conectores de cisalhamento. Trata-se de um elemento de viga tridimensional, com dois nós e seis graus de liberdade por nó referente às translações e rotações nos eixos x, y e z.

Este elemento foi escolhido por propiciar uma análise mais simples dos conectores de cisalhamento, no entanto, representa devidamente o modelo simulado. O elemento responde a esforços de flexão, representa bem as tensões ao longo de seu comprimento e permite a definição da seção transversal do elemento.

Figura 3.5 - Elemento B31 com numeração dos dois nós e ponto de integração.



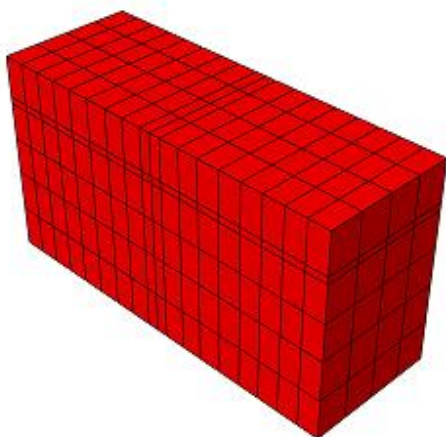
Fonte: SIMULIA (2009)

3.4 Definição da malha de elementos finitos

Os modelos desenvolvidos são compostos por três elementos: laje de concreto, viga de aço e o conector de cisalhamento (figura 3.6). Cada um dos elementos foi discretizado separadamente, no entanto, de maneira a coincidir os nós em cada interface a fim de possibilitar interações e acoplamentos.

A simplificação do modelo em relação ao modelo completo foi idealizada com intuito de reduzir a quantidade de elementos e conseqüentemente o esforço computacional demandado visando reduzir o tempo de processamento da simulação. Vale salientar que os resultados obtidos com o modelo simplificado foram satisfatórios se comparados àqueles alusivos ao modelo inteiro com 8 (oito) conectores.

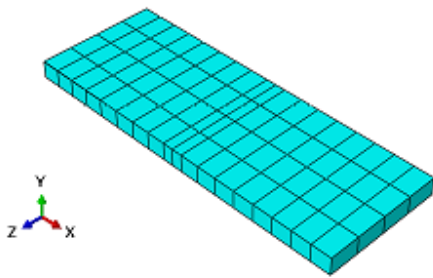
Figura 3.6 - Elementos do modelo de elementos finitos (modelo reduzido)



(a) laje de concreto



(c) conector de cisalhamento antes da integração



(b) perfil de aço



(d) conector de cisalhamento após integração

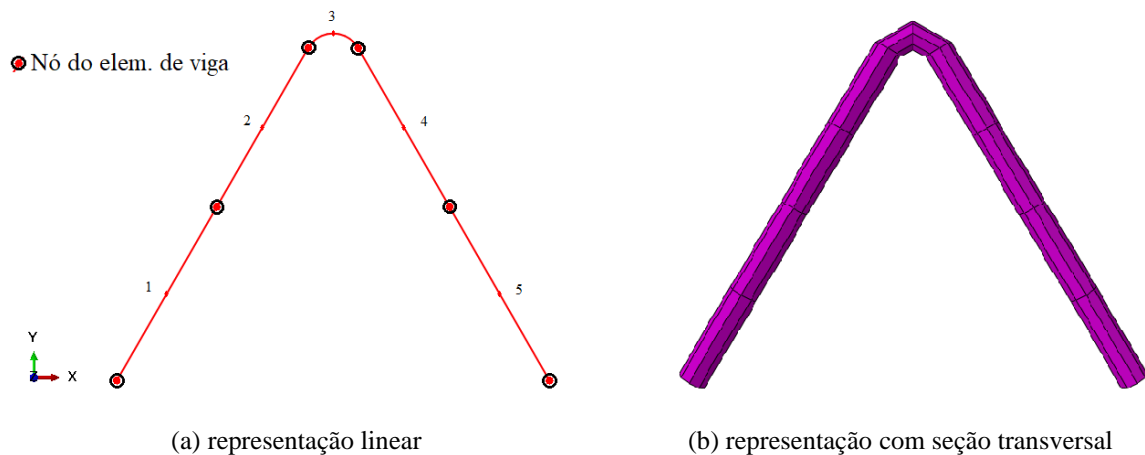
Fonte: Autor (2019)

3.4.1 Discretização do conector de cisalhamento

O conector de cisalhamento foi discretizado por meio de cinco elementos de viga do tipo B 31, o qual possui dois nós, um em cada extremidade e seis graus de liberdade referentes aos deslocamentos e rotações nas direções x , y e z (figura 3.7).

Devido a transferência de esforços cisalhantes atuantes principalmente na parte inferior do conector sobre a laje, mostrou-se necessária a utilização de cinco elementos, de forma a garantir a existência de um nó na região de transferência de esforços.

Figura 3.7 - Conector de cisalhamento discretizado



(a) representação linear

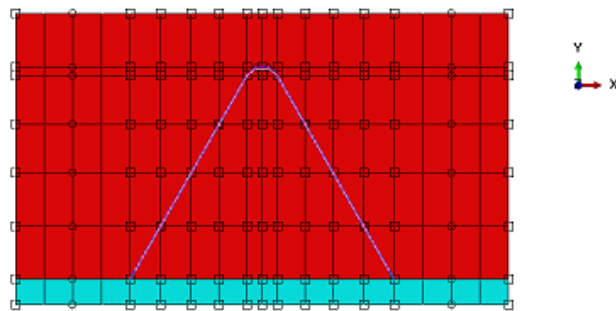
(b) representação com seção transversal

Fonte: Autor (2019)

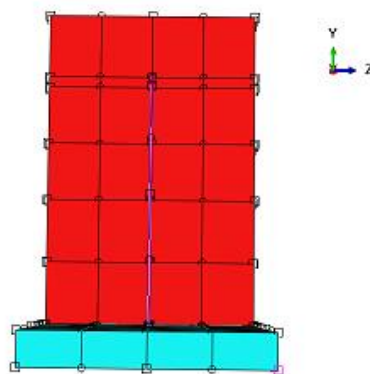
3.4.2 Discretização da laje de concreto

A laje de concreto foi discretizada nas direções x, y e z a fim de combinar seus nós com os nós dos conectores, ou seja, para cada nó referente ao conector existe um nó coincidente na laje. A representação da discretização é ilustrada na figura 3.8.

Figura 3.8 - Discretização da laje de concreto e do perfil de aço



(a) plano XY



(b) Plano XZ

Fonte: Autor (2019)

3.4.3 Discretização do perfil metálico

Semelhante ao mostrado no tópico anterior a respeito da laje de concreto, o perfil metálico foi discretizado em concordância com a laje de concreto e com o conector de forma a terem nós coincidentes a fim de propiciar ligações e acoplamentos discorridos posteriormente no item 3.4, segundo representado na figura 3.8.

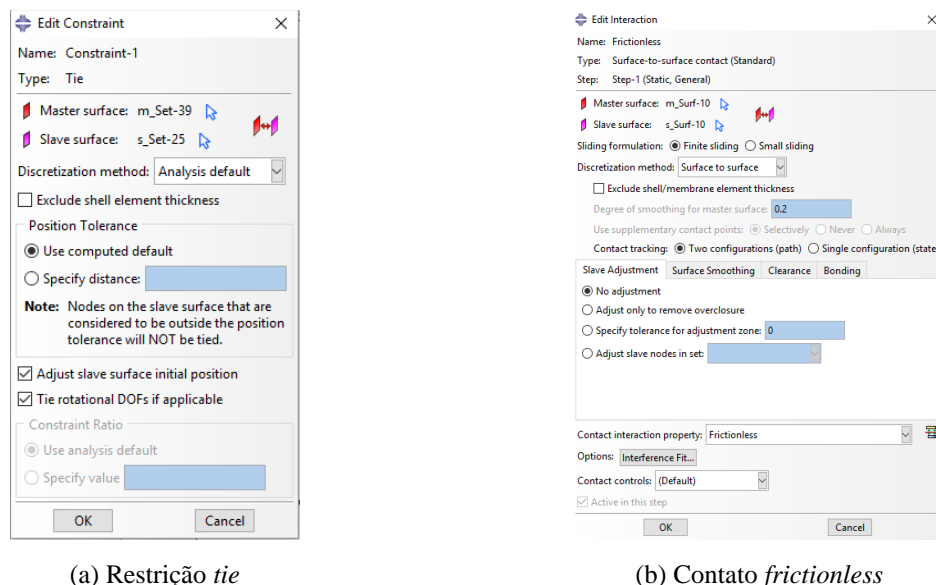
3.5 Acoplamentos e vinculações

No que se refere aos acoplamentos e vínculos, foram utilizados: compartilhamento de nós, propriedades de contato e de restrição. Dito isso, as condições foram:

- Perfil/Conector: através do compartilhamento de nós, o nó da base do conector é correspondente ao nó do perfil, compatibilizando rotações e translações e caracterizando engastamento.
- Laje/Conector: foram compatibilizados os nós e utilizado a propriedade de restrição *tie* (figura 3.9a) para gerar acoplamento na malha dos elementos nas três direções x, y e z.
- Perfil/Laje: o contato existente entre os elementos foi estabelecido através da propriedade de contato *frictionless* (figura 3.9b), entre a mesa superior do perfil e a face inferior da laje.

A propriedade de restrição *tie* (amarrar) permite prender duas regiões, mesmo que as malhas não sejam correspondentes, para que não haja movimento relativo entre elas. Já a propriedade de contato *frictionless* (sem atrito) é aplicada sobre duas superfícies as quais deslizam livremente e sem atrito.

Figura 3.9 - Interface do sistema de edição de propriedade de contato, e restrição.

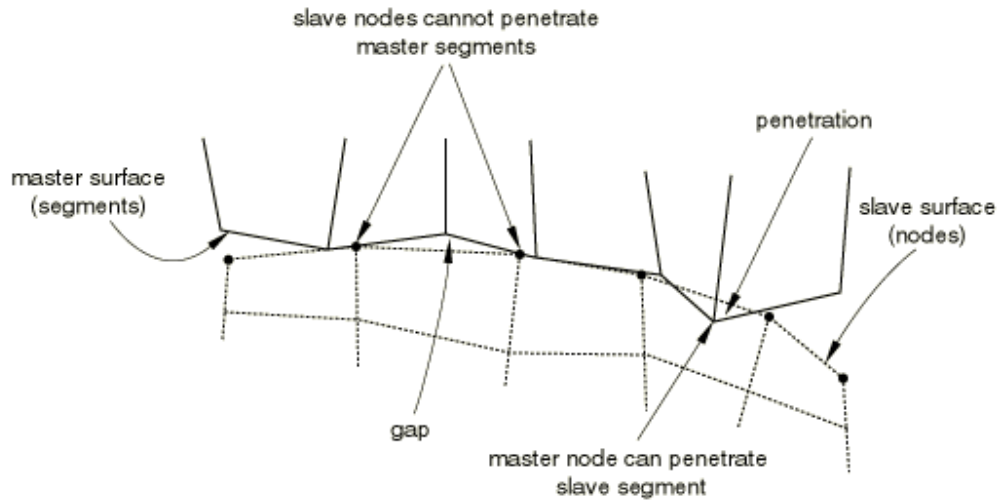


Fonte: Autor (2019)

A definição das superfícies de contato *master-slave* é feito considerando que os nós da superfície *slave* interagem com os nós da superfície *master*, de forma que os nós da superfície

master podem, a princípio, penetrar na superfície *slave* sem impedimentos. Assim, a região *master* pode ser chamada de rígida e a *slave* de flexível. A interação entre as superfícies pode ser vista na figura 3.10.

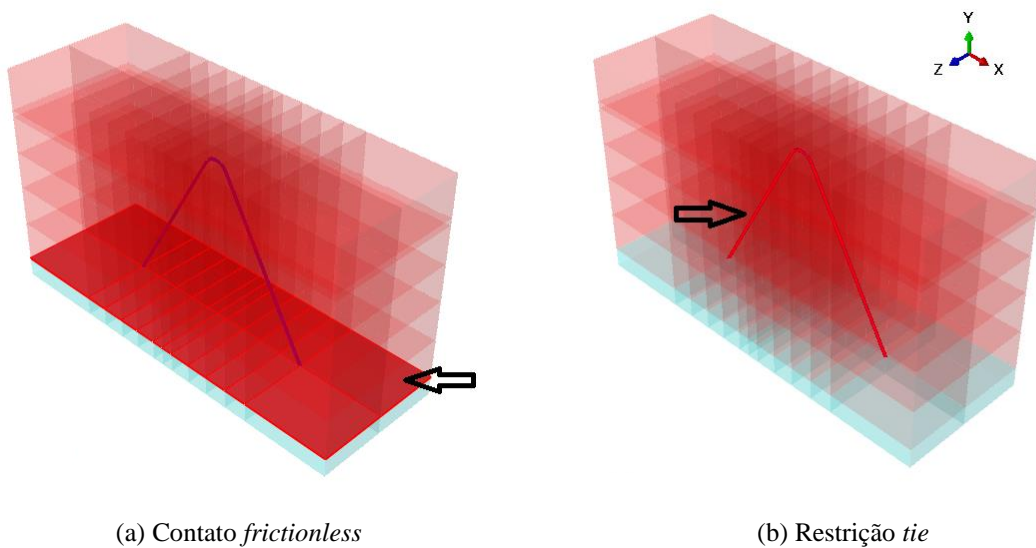
Figura 3.10 - Superfícies master e slave.



Fonte: SIMULIA (2009)

Na propriedade de restrição *tie*, a região de nós da laje em contato com o conector é a superfície rígida (*master surface*) e o corpo do conector é a superfície flexível (*slave surface*). Já na propriedade *frictionless*, a superfície inferior da laje é a flexível e a superfície superior do perfil é a rígida. A figura 3.11 ilustra os pares de contato.

Figura 3.11 - Pares de contato *master-slave*



(a) Contato *frictionless*

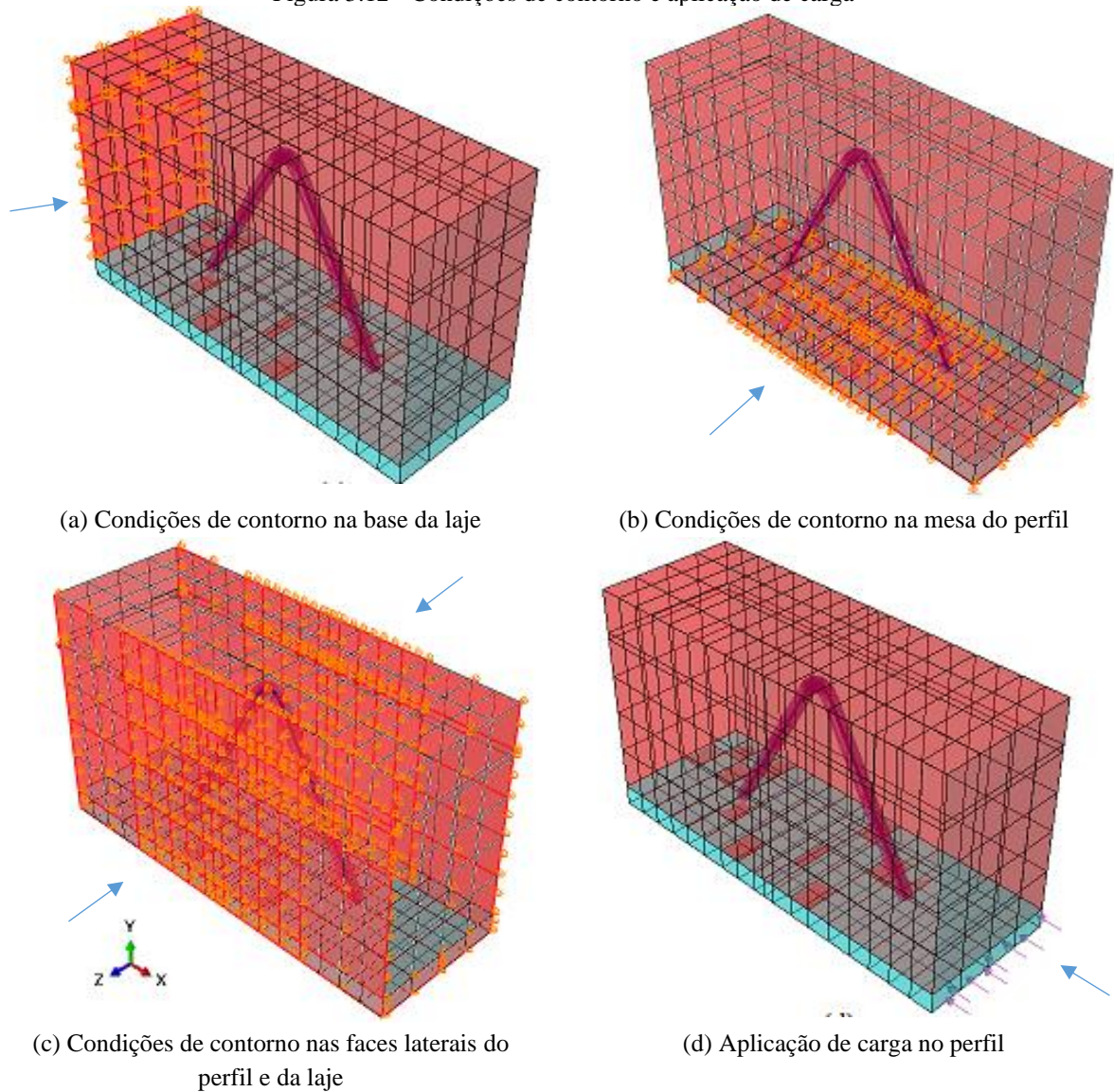
(b) Restrição *tie*

Fonte: Autor (2019)

3.6 Aplicação de carga e condições de contorno

As condições de contorno adotadas visam reproduzir no modelo numérico as mesmas condições utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto realizado em laboratório. A Figura 3.12 (a) e (b), ilustram respectivamente, restrição nas translações em x , y e z da face inferior da laje e restrição nas translações y e z na superfície debaixo da mesa perfil. Já a figura 3.12 (c) mostra a restrição das translações no eixo z tanto do perfil quanto da laje aplicado devido a condição de simetria e escolha do modelo simplificado. O carregamento foi aplicado a face superior do perfil metálico (Figura 3.12 (d)) e transferido por meio dos conectores de cisalhamento para a laje de concreto.

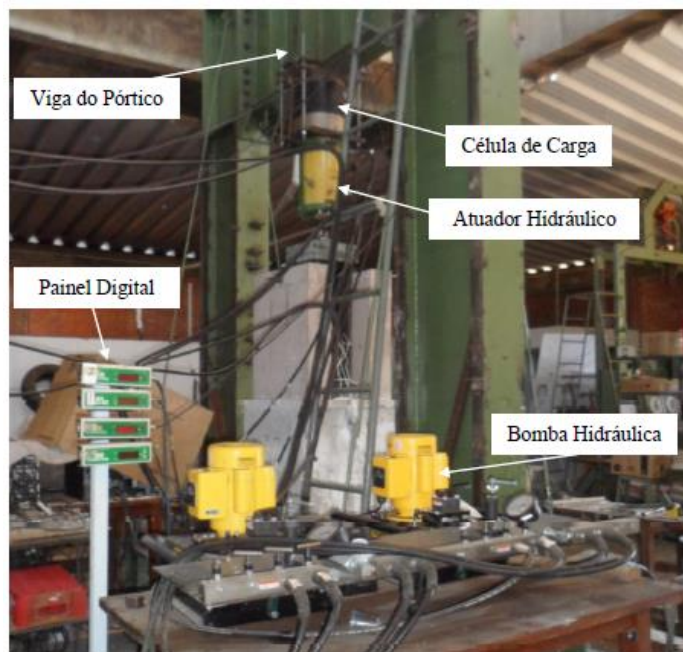
Figura 3.12 - Condições de contorno e aplicação de carga



Fonte: Autor (2019)

A figura 3.13 ilustra a aplicação da carga e o sistema de aquisição de dados nos modelos experimentais executados por Barbosa em 2016 durante a execução do ensaio de cisalhamento direto (*push-out*).

Figura 3.13 - Sistema de aplicação de cargas e aquisição durante ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: BARBOSA (2016)

3.7 Propriedades dos materiais

Barbosa (2016) caracterizou o concreto e os vergalhões de CA-50 ensaiados experimentalmente através dos ensaios e os valores obtidos para o módulo de elasticidade e utilizados na simulação numérica no *software* comercial estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas verificadas experimentalmente.

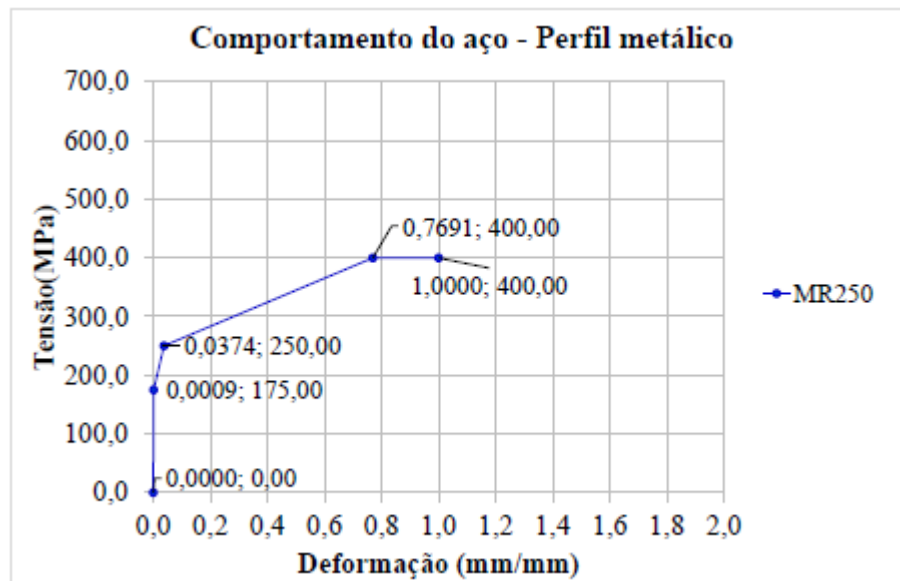
Material	Módulo de elasticidade (E)
CA-50 Ø10,0	194,5 GPa
CA-50 Ø12,5	195,3 GPa
Concreto	26,0 GPa

Fonte: Adaptado Barbosa (2016)

Cavalcante (2010) caracterizou o perfil metálico por meio da curva de tensão x deformação, figura 3.14, e verificou o comportamento não linear do material. Desta forma, para a simulação numérica realizada no regime elástico, adotou-se valor médio de 210 GPa.

Na modelagem numérica adotou-se o coeficiente de Poisson (ν) do aço igual a 0,30 e para o concreto, ν é igual a 0,20.

Figura 3.14 - Comportamento do perfil metálico.

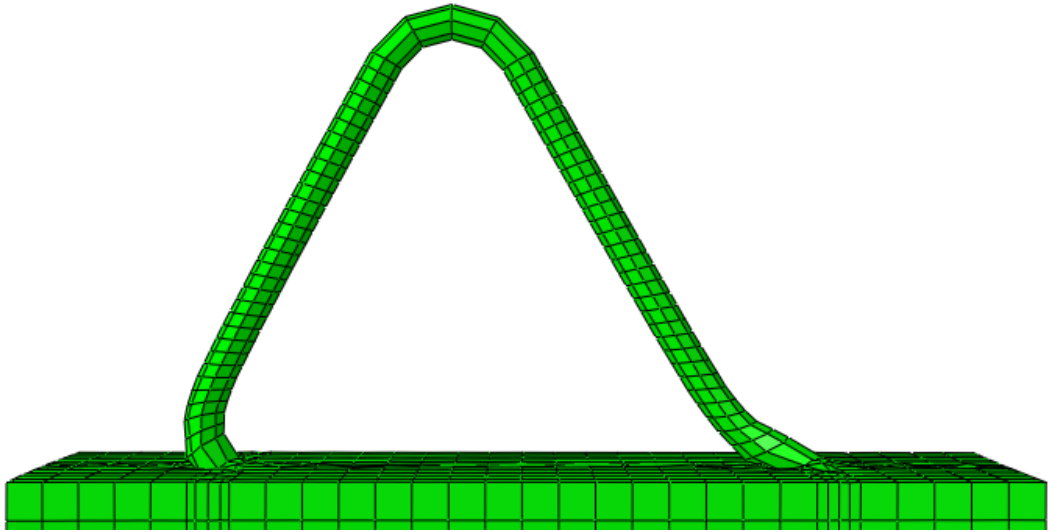


Fonte: Cavalcante (2010)

3.8 Simulação com elemento sólido

Durante a elaboração do modelo numérico realizou-se um teste de modelagem com o mesmo arranjo apresentado no item 3.1, no entanto com o conector sendo elemento sólido, do tipo C3D8R, conforme item 3.2.1. As configurações de acoplamentos, carregamento, características dos materiais e condições de contorno seguiram o exposto nos itens 3.4, 3.5 e 3.6 supracitados. Já a definição da malha de elementos finitos mostra-se complexa devido a necessidade de realizar um “furo” para posicionamento do conector de cisalhamento de forma que a posição dos nós na face externa do conector e os nós internos do furo da laje não se configura perfeitamente coincidente. Dito isso, a figura 3.12 mostra a configuração descrita cujo arranjo é mais pesado, ou seja, com mais elementos e por isso, necessita de um maior tempo de processamento comparado ao arranjo utilizando elemento de viga.

Figura 3.15 - Deformada apresentada pelo modelo com elementos sólidos.



Fonte: Autor (2019)

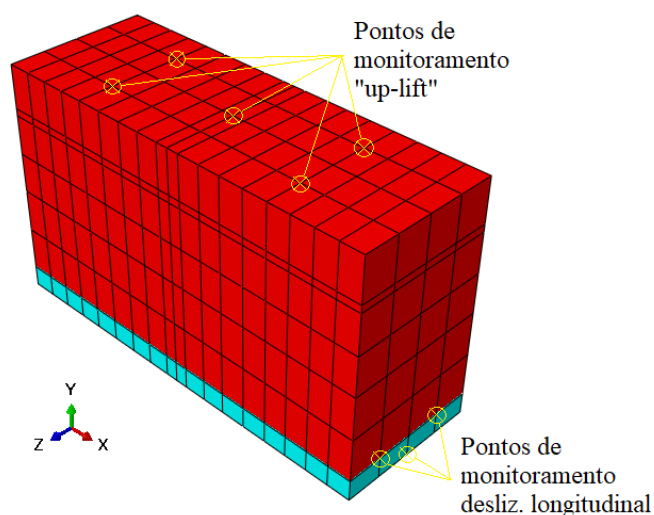
Percebe-se na figura 3.12 distorções aparentes na região de conexão entre perfil e conector justificada pela não coincidência de nós na utilização na propriedade *tie* para realização do acoplamento conector-laje. Pode-se ressaltar que o número de elementos é bem superior com a utilização de elementos sólidos e mesmo um modelo nessa configuração calibrado seria robusto para análises mais complexas, como uma viga inteiriça ou um quadro de uma ponte. Portanto, devido as dificuldades encontradas nesse viés da simulação a opção de modelagem utilizando elemento de viga se manteve coerente.

4. RESULTADOS

O primeiro parâmetro avaliado na validação do modelo numérico foi o deslocamento longitudinal do perfil em função da carga aplicada apresentado no item 4.1. Posteriormente utiliza-se o “*up-lift*”, afastamento transversal da laje em relação ao perfil, para análise do modelo (item 4.2). Enfim, foi avaliada a distribuição de tensões no perfil e nos conectores de cisalhamento (item 4.3). Em seguida, avalia-se a conformação das deformadas dos conectores e sua distribuição de tensões (item 4.4).

As verificações de deslocamentos foram feitas a partir de pontos da malha na face do perfil e da laje, a fim de analisar, respectivamente, deslocamento longitudinal e “*up-lift*”. A figura 4.1 mostra os pontos utilizados para coleta de dados.

Figura 4.1 - Pontos de referência para aquisição de deslocamentos.



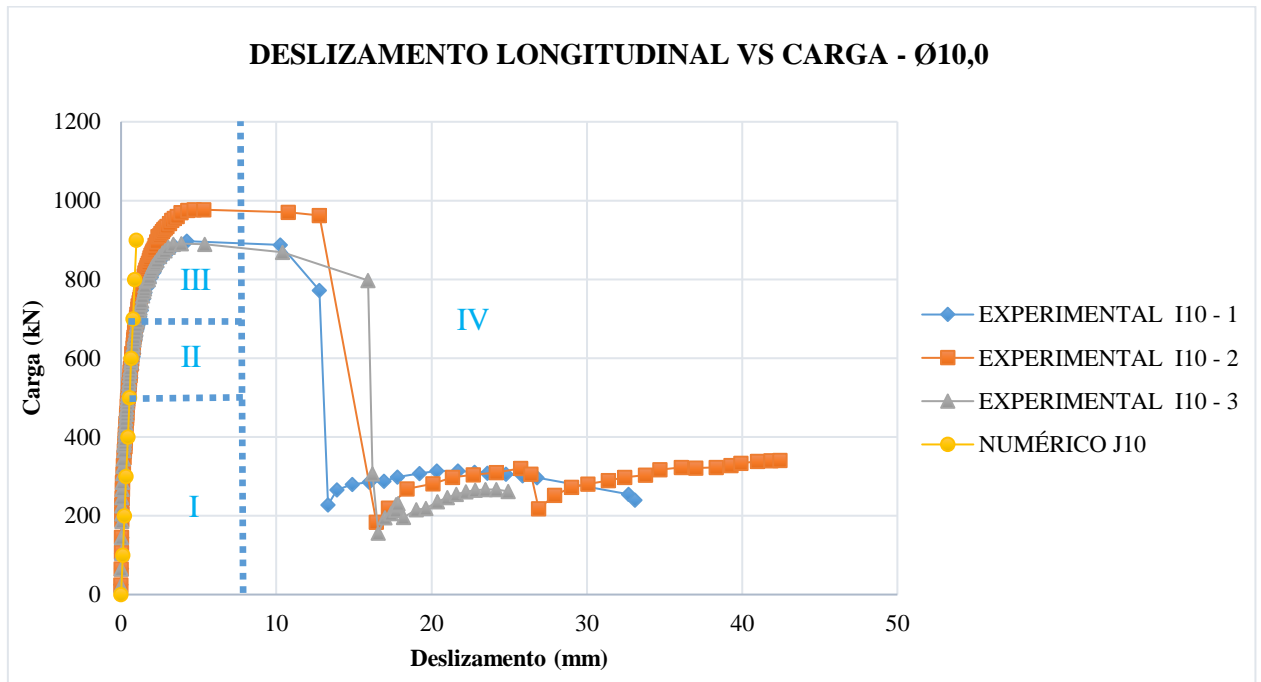
Fonte: Autor (2019)

O deslocamento para cada carregamento é obtido através da média dos deslocamentos verificados nos pontos de verificação da face. Em suma, média dos três valores para deslocamento na direção ‘x’, obtidos na face do perfil para deslocamento longitudinal, e média dos cinco valores verificados na face ortogonal ao sentido de aplicação do carregamento, na direção y, na face da laje para deslocamento transversal, “*up-lift*”.

4.1. Deslizamento longitudinal

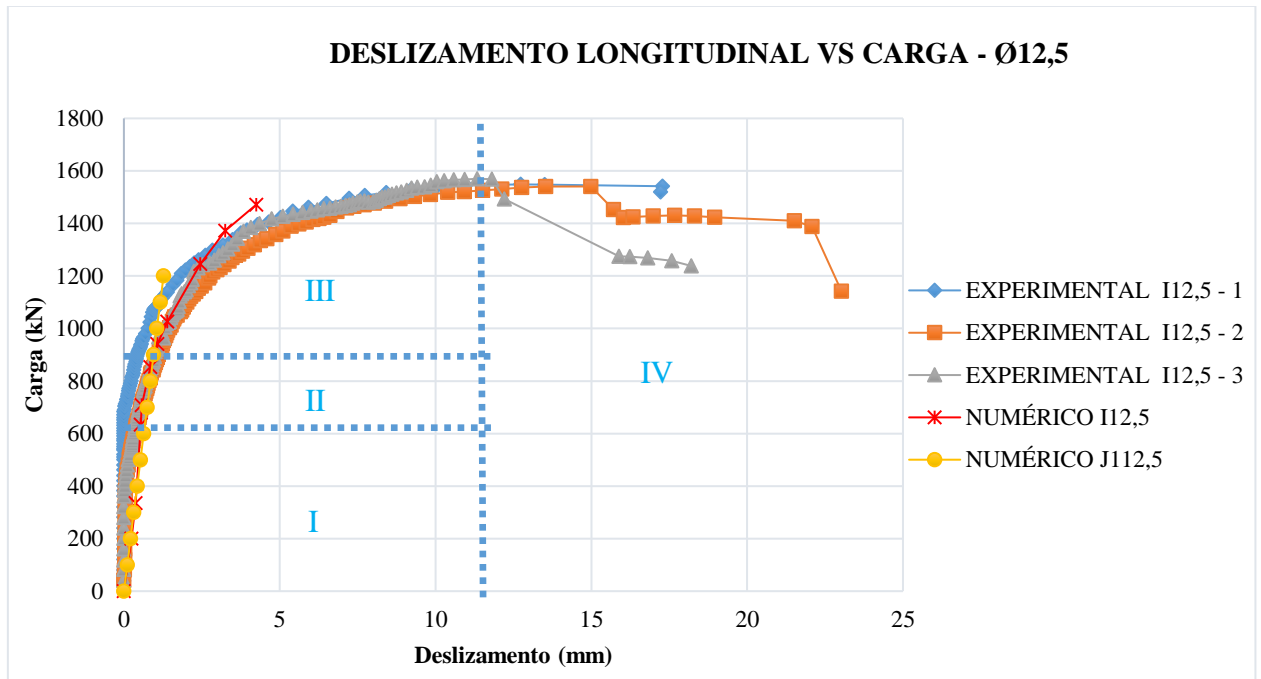
Os gráficos mostrados nas figuras 4.2 e 4.3 descrevem a evolução do deslizamento longitudinal da face do perfil em função da aplicação do carregamento na estrutura simulada e as fases identificadas. As curvas logradas através dos modelos experimentais e numéricos por Barbosa (2016) são utilizadas para confrontar os valores numéricos obtidos. Por conseguinte, as séries de nomenclatura “I” pertencem a Barbosa (2016) e as de nomenclatura “J” são resultantes deste estudo. Conforme os parâmetros de materiais e restrições inseridos no código numérico o comportamento resultou em um grau de interação total, explanado no item 2.1.3).

Figura 4.2 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para conector treliçado isósceles de 10,0 mm.



Fonte: Autor (2019)

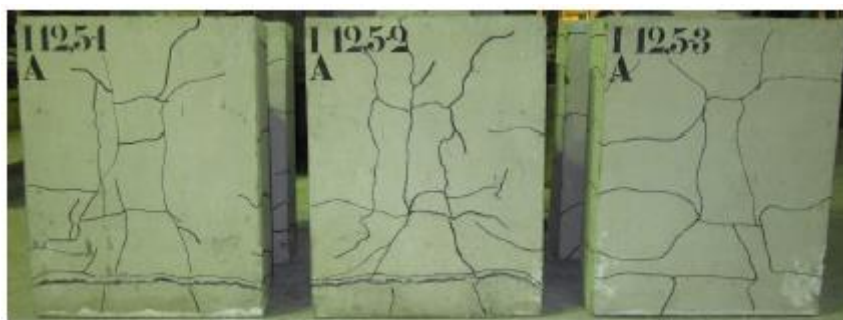
Figura 4.3 - Gráfico de deslizamento longitudinal médio por carga aplicada para conector treliçado isósceles de 12,5 mm.



Fonte: Autor (2019)

Os gráficos apresentados nas figuras 4.2 e 4.3 podem ser analisados basicamente em 4 fases. A reta da fase I com carregamentos de até 500 kN e 600 kN para modelos com diâmetros de 10,0 e 12,5 milímetros, respectivamente, descrevem o comportamento puramente elástico da estrutura, no qual as deformações obtidas podem ser recuperadas após o descarregamento. A fase II é dominada pelo início da microfissuração do concreto (figura 4.4) que permite maior deformação do conector e, conseqüentemente, maiores valores de deslizamento longitudinal do perfil, evidenciado pela maior inclinação da série no trecho contrastando-se com a fase I. A fase II engloba os intervalos de carga entre 500 kN e 750 kN, para modelo de 10,0 mm, e entre 600 kN e 900 kN para o modelo de diâmetro maior. A fase III trata-se do regime plástico da estrutura, que apresenta deformações permanentes dos elementos e tendência ascendente com aumento significativo do deslizamento longitudinal obtido nos modelos. E por fim a fase IV que retrata a ruptura dos modelos ensaiados.

Figura 4.4 - Mapa de fissuras das faces externas das lajes dos modelos I12,5



(a) Lado A



(b) Lado B

Fonte: Barbosa (2016)

Nota-se que as séries apresentam comportamento assíntota vertical em deslizamentos de 1 milímetro observados nas fases I e II (figuras 4.3 e 4.4).

As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os valores de deslizamento longitudinal obtidos para os modelos com 10,0 e 12,5 milímetros.

Tabela 4.1 - Deslizamento dos perfis metálicos por intensidade de carga com conectores de 10,0 mm.

Carga (kN)	Deslocamento/Série			
	EXP. I10-1	EXP. I10-2	EXP. I10-3	NUM. J10
200	0,060	0,055	0,050	0,220
400	0,300	0,290	0,250	0,440
600	0,739	0,687	0,660	0,660
800	1,97	1,455	1,755	0,880

Fonte: Barbosa (2016) e Autor (2019)

Tabela 4.2 - Deslizamento dos perfis metálicos por intensidade de carga com conectores de 12,5 mm.

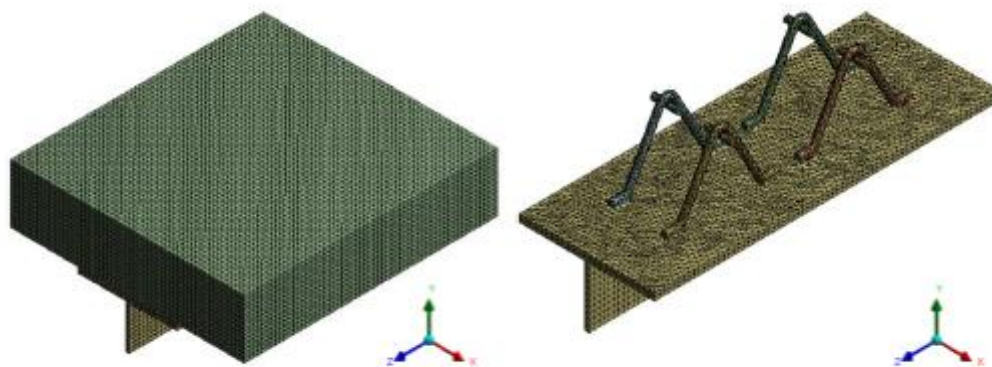
Carga (kN)	Deslocamento/Série				
	EXP. I12,5-1	EXP. I12,5-2	EXP. I12,5-3	NUM. I12,5	J12,5
200	0	0	0	0,247	0,212
400	0	0,06	0,03	0,417	0,424
600	0	0,3425	0,325	0,636	0,636
800	0	0,805	0,7275	0,748	0,848
1000	0,775	1,4674	1,325	1,294	1,06
1200	1,835	2,7625	2,210	2,231	1,272

Fonte: Barbosa (2016) e Autor (2019)

Conforme valores apresentados na tabela 4.1 verifica-se variação máxima entre os deslizamentos das séries I e J de 0,2 milímetro com carregamento até 600 kN. É observado também que as séries EXPERIMENTAL I10 e a série NUMÉRICO J10 se aproximam nas cargas de 200, 400 e 600 kN com valores inferiores. Nestes carregamentos são delineadas as fases I e II do comportamento do modelo. Já para o carregamento de 800 kN, fase III, observa-se variação entre as séries da ordem de 1 milímetro, configurando o comportamento esperado para esta fase, onde as curvas experimentais do deslizamento longitudinal apresentam maior inclinação e são verificados valores maiores. Por isso, o valor numérico obtido na série J10, por conter apenas propriedades elásticas dos materiais, apresenta valores menores e com maior variação nesta condição de carregamento.

Segundo análise conjunta da figura 4.3 e da tabela 4.2, nota-se que os resultados obtidos através da simulação com o modelo mais simples e reduzido, se comparado ao modelo NUMÉRICO I12,5 obtém resultados satisfatórios. Observa-se que até o término da fase II, carga de aproximadamente 600 kN, os modelos numéricos I e J se sobrepõem e se ambos se aproximam. Ressalta-se que o modelo numérico desenvolvido por Barbosa (2016), figura 4.5, trata-se de um modelo robusto com milhares de nós e elementos que aplica apenas elementos sólidos enquanto o modelo desenvolvido neste estudo apresenta geometria reduzida e utiliza elementos sólidos e elementos de viga na simulação, no entanto necessita de resultados experimentais a fim de calibração do modelo desenvolvido.

Figura 4.5 - Modelos em elementos finitos dos ensaios de *push-out* para os conectores treliçados utilizado como comparativo.



Fonte: Barbosa (2016)

Conforme valores apresentados na tabela 4.2 verifica-se variação máxima entre os deslocamentos das séries I e J de 0,2 milímetro com carregamento até 600 kN. É observado também que as séries EXPERIMENTAL I10 e a série NUMÉRICO J10 se aproximam nas cargas de 200, 400 e 600 kN com valores experimentais ligeiramente inferiores. Nestes carregamentos são delineadas as fases I e II do comportamento do modelo. Já para o carregamento de 800 kN, fase III, observa-se variação entre as séries da ordem de 1 milímetro, configurando o comportamento esperado para esta fase, onde as curvas experimentais do deslocamento longitudinal apresentam maior inclinação e são verificados valores maiores. Por isso, o valor numérico obtido na série J10, por conter apenas propriedades elásticas dos materiais, apresenta valores menores e com maior variação nesta condição de carregamento.

Segundo valores apresentados na tabela 4.2, o comportamento numérico J assemelha-se ao comportamento numérico I com variações máximas de 0,3 milímetros até a carga de 800 kN, fases I e II, com resultados numéricos de deslocamento longitudinal maiores que os experimentais. E para cargas superiores, 1000 kN a 1200 kN, a aproximação fica da ordem de 0,3 e 1,5 milímetros, respectivamente, com valores experimentais superiores aos numéricos. Contudo, nesta faixa de carregamento já é configurado a fase III, ou seja, comportamento plástico, o que justifica valores superiores e afastamento crescente dentre as séries I12,5 e J12,5. De modo geral, as curvas obtidas numericamente simularam de forma satisfatória o comportamento das vigas mistas quanto ao deslocamento longitudinal considerando o comportamento puramente elástico da estrutura, fase I, e até o comportamento elásto-plástico no qual se iniciam as microfissuras do concreto, fase II.

Com intuito de avaliar de maneira mais completa o comportamento dos modelos a imagem 4.6 representa a distribuição dos deslocamentos na direção x para o perfil metálico, os conectores de cisalhamento e a deformada dos elementos. Os resultados foram plotados para as cargas de 200 kN, 400 kN, 600 kN e 800 kN.

Figura 4.6 - Deslocamentos na direção do eixo x para perfis metálicos e conectores de cisalhamento.

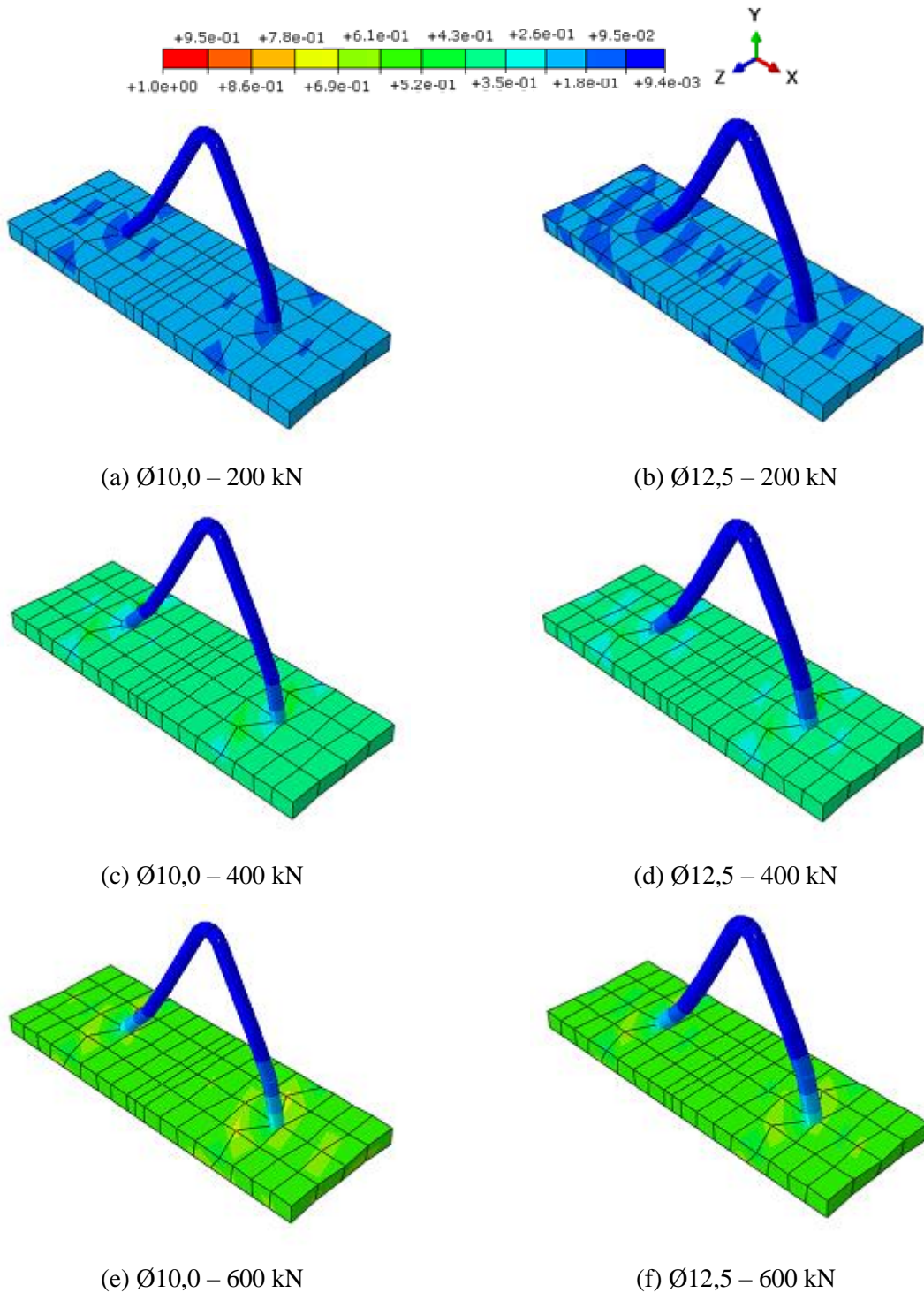
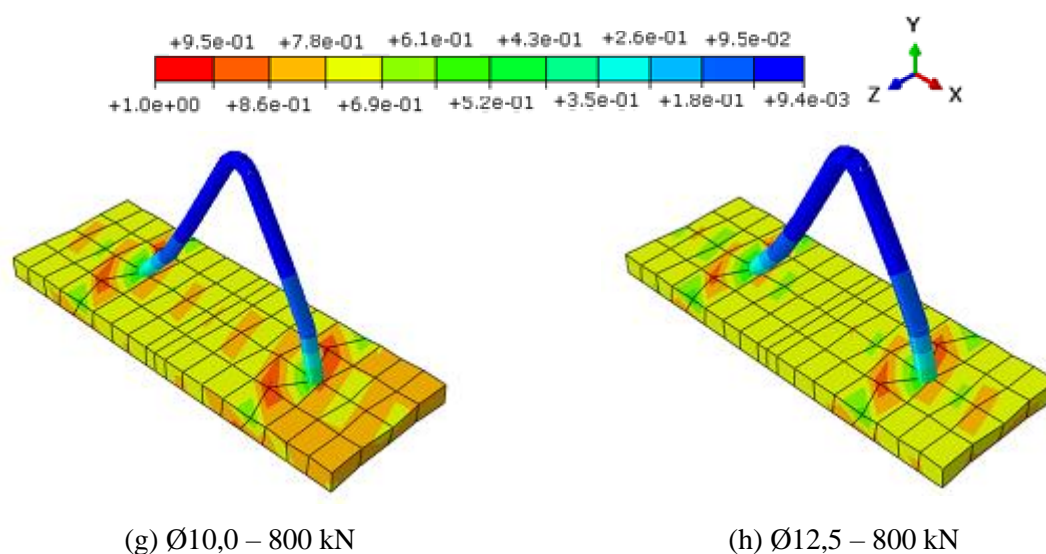


Figura 4.6 - Deslocamentos na direção do eixo x para perfis metálicos e conectores de cisalhamento
(Continuação).



Fonte: Autor (2019)

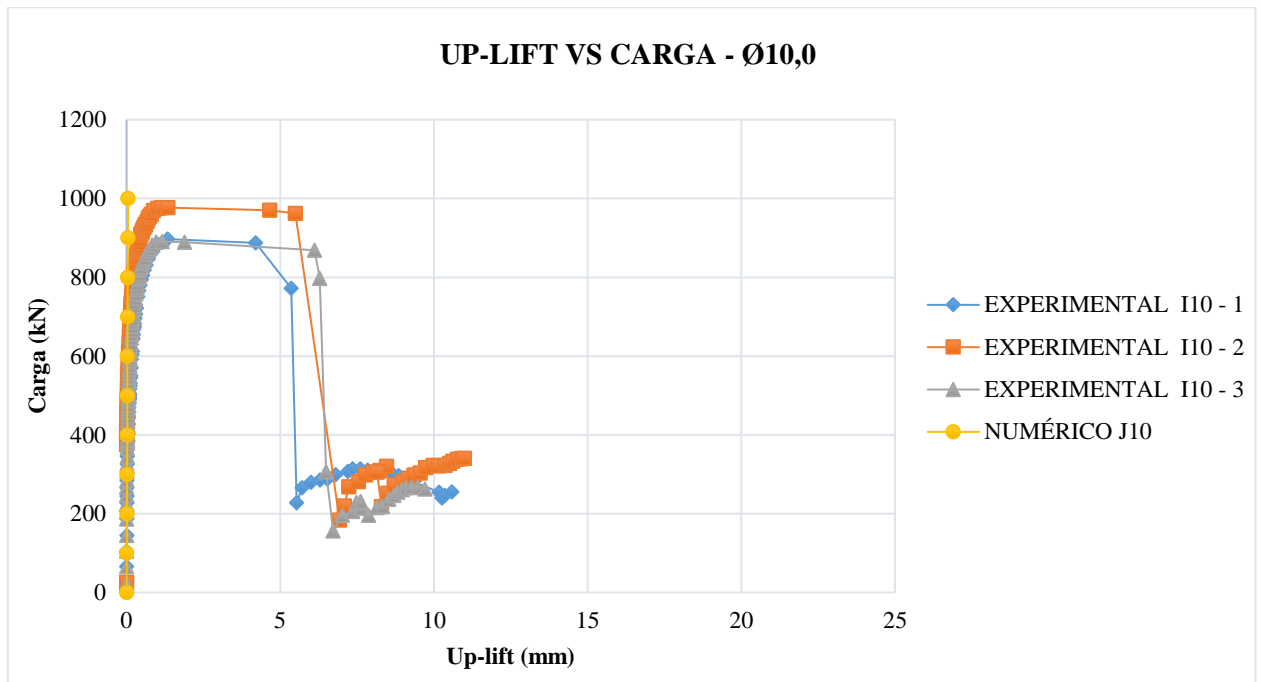
Verificando os conectores de 10,0 e 12,5 milímetros, observa-se um deslizamento de notável semelhança até as cargas de 600 kN. No entanto para carga de 800 kN, instante em que o conjunto já apresenta comportamento plástico, nota-se maior empenamento no diagrama da figura 4.5-(g), conector de 10,0 mm, comparado a figura 4.5-(h), conector de 12,5 mm, visto sua seção transversal reduzida. Desta maneira, a maior deformação do conector de seção menor resulta em maiores deslocamentos da base, ou seja, do perfil metálico, conforme verificado das tabelas 4.1 e 4.2.

4.2. “Up-lift”

O efeito conhecido como *up-lift* consiste na separação transversal entre a laje de concreto e o perfil metálico ocasionado devido as forças de cisalhamento transversais aos conectores. A NBR 8800:2008 utiliza valores máximos de *up-lift* resistido pelos conectores na metodologia de dimensionamento, de forma a justificar a avaliação desse parâmetro.

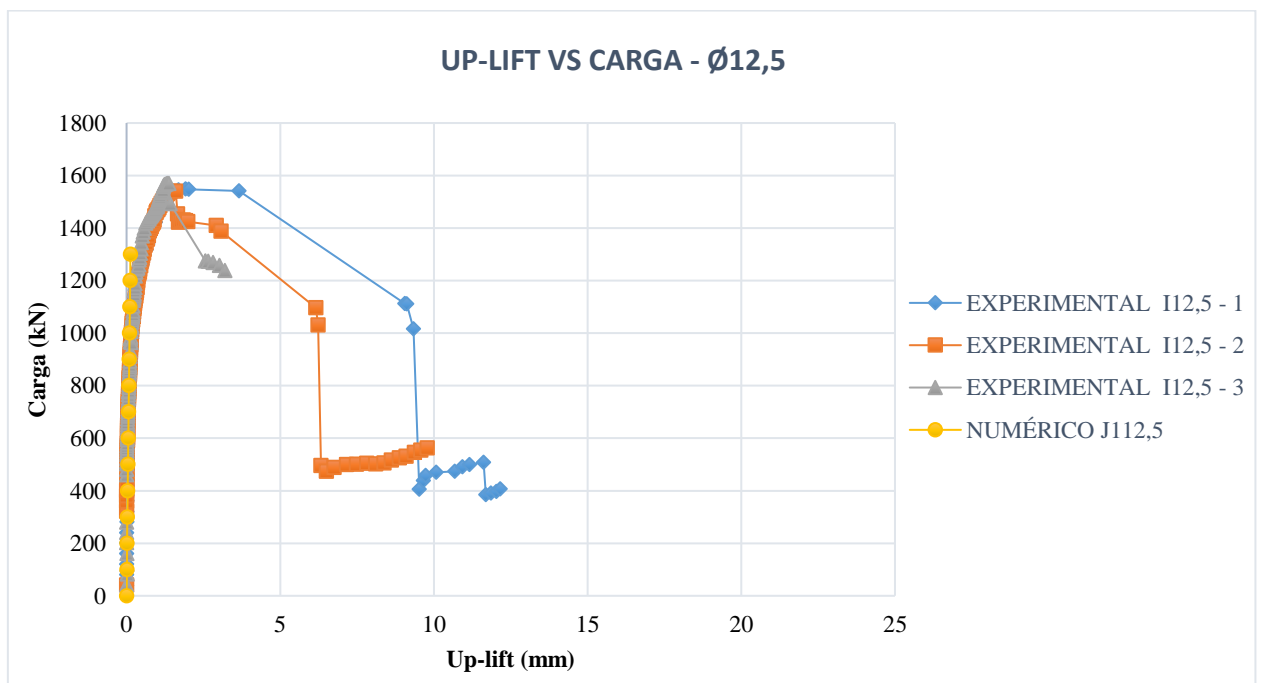
Assim como no item 4.1, as séries denominadas I foram obtidas a partir de Barbosa (2016) e as denominadas J são resultantes das análises deste trabalho. Os gráficos apresentados nas figuras 4.5 e 4.6 descrevem a evolução do deslocamento transversal da face da laje de concreto em função da aplicação do carregamento na estrutura simulada.

Figura 4.7 - Gráfico de up-lift por carga aplicada para conector treliçado isósceles de 10,0 mm.



Fonte: Autor (2019)

Figura 4.8 - Gráfico de up-lift por carga aplicada para conector treliçado isósceles de 12,5,0 mm.



Fonte: Autor (2019)

Analisando as figuras 4.5 e 4.6 observa-se concordância entre os valores de *up-lift* registrados na simulação numérica com a modelagem experimental.

Para a série com diâmetro de 10 milímetros, o comportamento é similar ao apresentado do item anterior, representando aproximação crescente até a carga de 500 kN e a para carregamentos superiores apresenta acuracidade reduzida devido ao término no regime elástico do modelo.

No modelo de 12,5 milímetros de diâmetro, observa-se também o comportamento descrito anteriormente, apresentando alta aproximação até o carregamento de 600 kN e mantendo acuracidade elevada até 900 kN, aproximadamente, pontuando o início do comportamento puramente plástico.

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os valores obtidos para *up-lift* no carregamento de 500 kN, para os modelos de conectores de cisalhamento com 10,0 e 12,5 mm de diâmetro, respectivamente.

Tabela 4.3 - Up-lift da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 10,0 mm.

Carga (kN)	Deslocamento/Série			
	EXP. I10-1	EXP. I10-2	EXP. I10-3	NUM. J10
500	0,106	0,0245	0,0655	0,025

Fonte: Autor (2019)

Tabela 4.4 - Up-lift da laje de concreto por intensidade de carga com conectores de 12,5 mm.

Carga (kN)	Deslocamento/Série			
	EXP. I12,5-1	EXP. I12,5-2	EXP. I12,5-3	NUM. J12,5
500	0,0215	0,019	0,0035	0,0185

Fonte: Autor (2019)

Verifica-se na análise comparativa dos valores apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4 a diferença de valores entre os conectores visto a rigidez maior rigidez do modelo com maior diâmetro (12,5 mm). Resumidamente, os valores de *up-lift* obtidos numericamente diferem levemente dos valores experimentais e numéricos comparados com ordem de grandeza de centésimo de milímetros nos modelos, mostrando assim a dificuldade de aferição do modelo numérico visto sua precisão e permitindo a consideração dessas variações aceitáveis.

4.3. Tensão de Mises

As tensões foram verificadas nos perfis metálicos e nos conectores de cisalhamento, a partir do critério de tensões equivalentes de Von Mises. Para a análise, considerou-se 4 situações de carga diferentes, conforme apresentado na figura 4.7, 200 kN, 400 kN, 600 kN e 800 kN atuando na simulação do ensaio de *push-out* (cisalhamento direto).

Figura 4.9 - Distribuição de tensões equivalentes de Von Mises (kN/mm²) no modelo numérico.

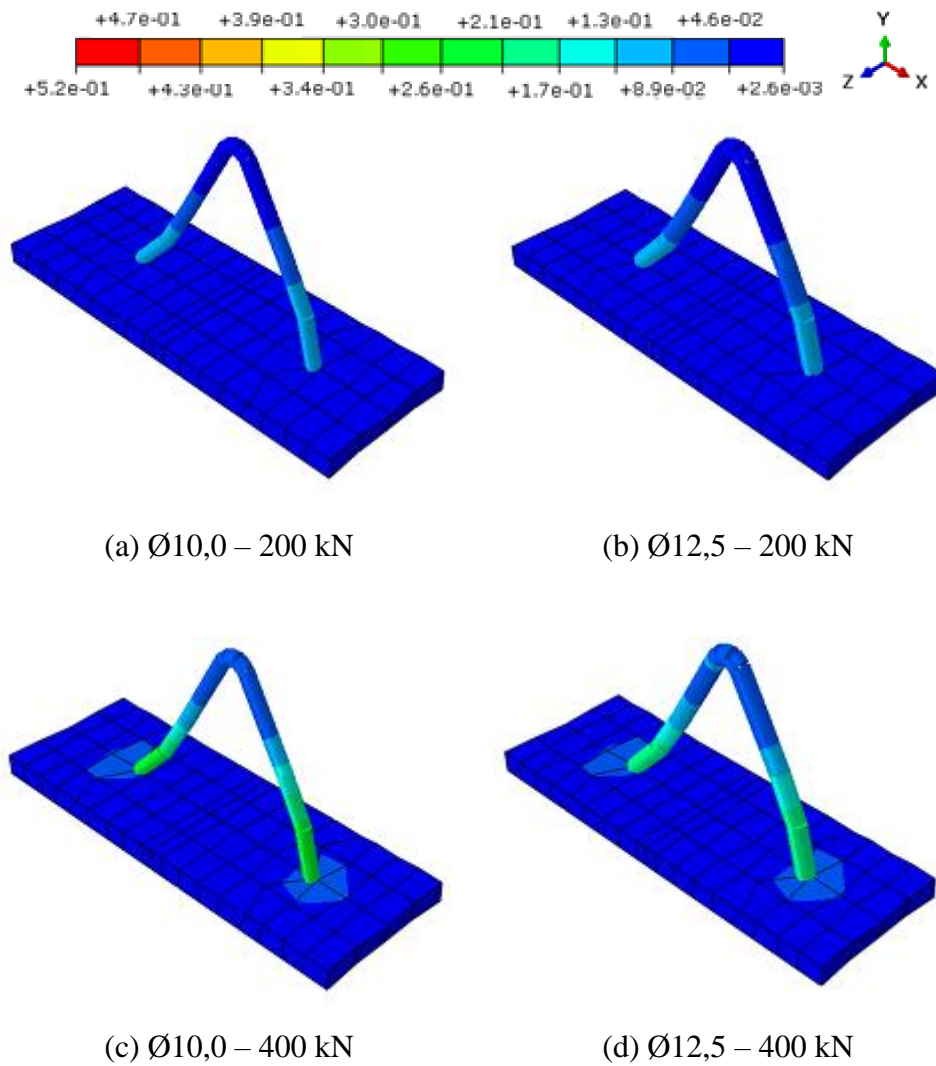
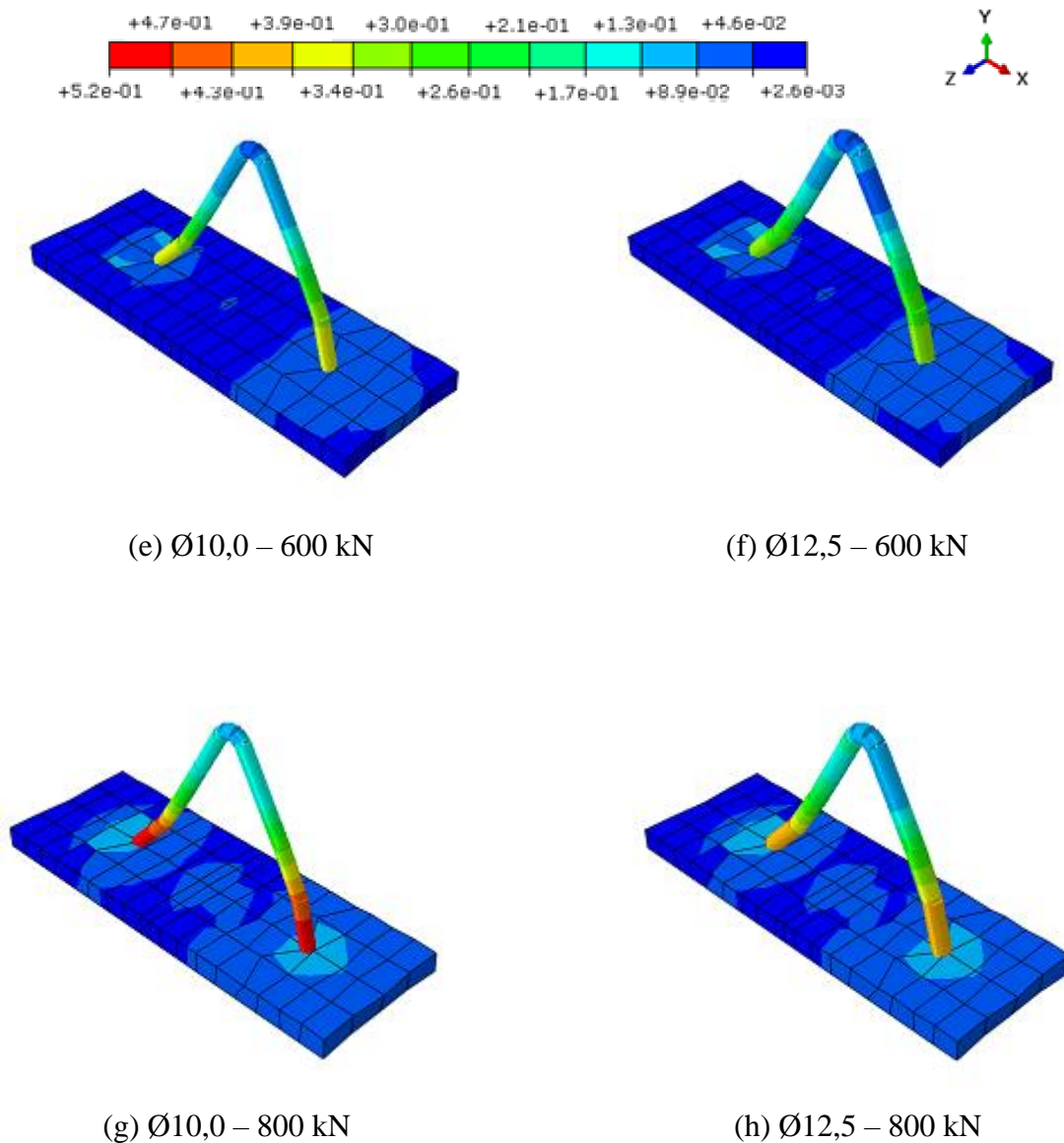


Figura 4.9 - Distribuição de tensões equivalentes de Von Mises (kN/mm²) no modelo numérico (Continuação).



Fonte: Autor (2019)

Analisando a distribuição de tensões nos perfis, figura 4.7, observa-se que os conectores com maiores diâmetros apresentam menores valores de tensão em relação aos conectores de diâmetros menores. Nota-se também que os maiores valores de tensão foram verificados nos conectores de cisalhamento, na região próxima ao plano de cisalhamento entre a laje e o perfil metálico, evidenciando a um estudo de dimensionamento desta solda e a necessidade de execução de soldas resistentes na ligação entre perfil e conector.

A distribuição de tensões no perfil segue um padrão semelhante até 400kN de distribuição de tensão, visto que ambos estão em regime puramente elástico, fase I, explanada

no item 4.1. Sob 600 kN de carregamento, quando o estado de plastificação é iniciado, fase II, o conector de 10 mm apresenta maior estado de tensão quanto ao de 12,5 mm, devido a sua reduzida seção transversal.

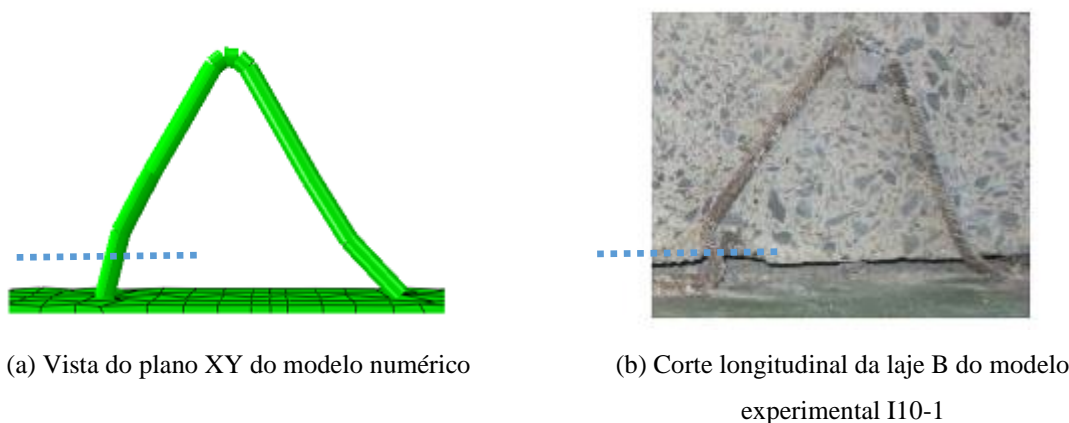
Mais explicitamente a 800 kN verifica-se uma concentração de tensões na base do conector e nota-se que para conectores de maior diâmetro ocorre uma distribuição mais uniforme das tensões entre o conector e o perfil. Diferentemente do conector de 10 mm que absorve maior parcela das tensões, resultando em um maior empenamento do conector e consequentemente maiores deslizamentos do perfil, conforme verificado no item 4.1.

4.4. Análise do conector de cisalhamento

4.4.1. Conformação da deformada

Para complementar, a figura 4.9 permite avaliar o comparativo entre as deformadas obtidas nos modelos experimental de Barbosa (2016) e o numérico estudado neste trabalho.

Figura 4.10 - Comparativo das deformada dos conectores de cisalhamento.



Fonte: Autor (2019) e Barbosa (2016)

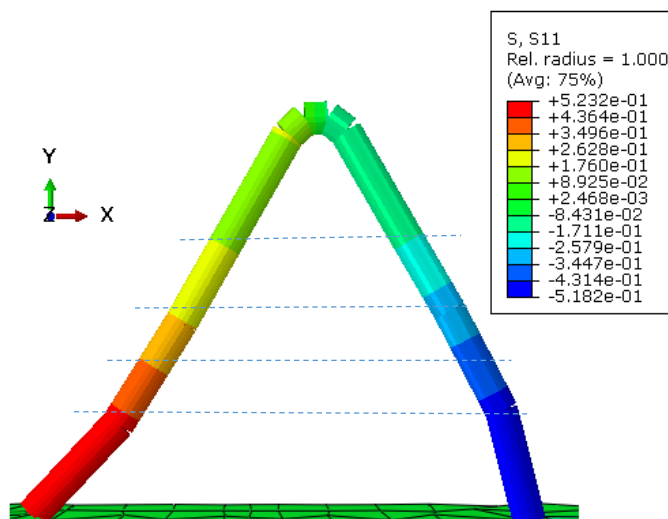
A diferença em termos de escala nas deformadas analisadas se deve ao fato de que a figura 4.9b trata-se da deformada do conector após a ruptura do modelo, assim o conector absorveu carga superior a carga absorvida pelo conector do modelo numérico (figura 4.9a) que atua no regime elástico. Contudo sua conformação obedece a um padrão em ambos os modelos. Com isso, é possível atestar concordância no comportamento conseguido a partir na simulação.

4.4.2. Conformação de tensões

Analisando o conector separadamente apenas na direção XX, figura 4.9, pode-se observar que no plano de tensões de cisalhamento do conector de comporta de maneira simétrica com sentidos opostos nos mesmos planos de tensões verificados. Tais tensões apresentam-se suavizadas ao se aproximarem do vértice do conector e potencializadas na região de ligação entre o conector e a o perfil metálico. Observa-se a concentração de tensão de compressão da perna esquerda do conector (tonalidade azul), enquanto se verifica tensão de tração na perna direita (tonalidade vermelha). Em razão desse comportamento, o efeito de flambagem é contido devido a imersão do conector no concreto.

A figura 4.9 ilustra o comportamento do conector de 10,0 mm de diâmetro submetido a uma tensão de 800 kN, entretanto este comportamento retrata também os demais conectores submetidos a tensões variáveis, porém com intensidades diferentes.

Figura 4.11 - Distribuição de tensões equivalentes na direção XX (kN/mm²) no modelo numérico de Ø10,0 para caga de 800kN.



Fonte: Autor (2019)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusão

Este trabalho teve como proposta desenvolver um modelo numérico simplificado de vigas mistas aço-concreto utilizando conectores de cisalhamento treliçados, tipo isósceles, constituídos de vergalhões de aço CA-50 com 10,0 e 12,5 milímetros de diâmetro, para simular o comportamento estrutural durante o ensaio de cisalhamento direto (*push-out*). Optou-se por desenvolver o modelo com auxílio do *software* comercial e utilizar a biblioteca de elementos finitos disponibilizada pelo programa.

A representação dos conectores de cisalhamento por meio de elemento de viga, proporcionou uma modelagem mais simples em relação àquelas em que são utilizados elementos tipo sólido, os quais exigem elevado refinamento da malha de elementos finitos e por isso, elevado esforço computacional. Contudo, proporcionou resultados coerentes quanto os parâmetros analisados.

Vale salientar que um modelo em estruturas mistas conta com inúmeras variações não mensuráveis, como a heterogeneidade do material concreto e seu estado triaxial de fissuração e deformação, além da mudança de rigidez do conector, de forma local, na base, região mais solicitada devido a solda.

A validação da estratégia de modelagem adequada foi realizada por meio da comparação entre resultados obtidos numericamente e resultados experimentais e numéricos apresentados por Barbosa (2016).

Em relação ao deslizamento longitudinal do perfil metálico, os valores obtidos para carregamentos de até 600 kN, carga na qual se configura, aproximadamente, o término do regime puramente elástico dos modelos, apresentaram precisão da ordem de décimos de milímetros de comparados aos modelos experimentais. Com relação ao modelo numérico robusto e com alta densidade de elementos na malha utilizado na comparação, a precisão alcançada foi da ordem de centésimo de milímetros. Por fim, conclui-se que para um mesmo carregamento, ocorre maior empenamento no conector de menor seção transversal e desta maneira, a maior deformação do conector de seção reduzida infere em maiores deslizamentos da base, ou seja, do perfil metálico.

No referente ao afastamento vertical, *up-lift*, as séries obtidas simularam de forma satisfatória o comportamento dos modelos experimentais durante o ensaio de cisalhamento direto, as discrepâncias máximas obtidas foram da ordem de grandeza de centésimos de milímetros. Nesta verificação o modelo de maior rigidez, ou seja, menores valores de *up-lift* foi com o conector de 12,5 mm, conforme o esperado.

A distribuição de tensões através do critério de Von Mises evidenciou os menores valores de tensão nos conectores com maiores diâmetros em relação aos conectores de diâmetros menores. Verificou-se também, individualmente, maiores valores de tensão nos conectores de cisalhamento, na região próxima ao plano de cisalhamento entre a laje e o perfil metálico, evidenciando a um estudo de dimensionamento desta solda e a necessidade de execução de soldas resistentes na ligação entre perfil e conector. Por fim, notou-se que para conectores de maior diâmetro ocorre uma distribuição mais uniforme das tensões entre o conector e o perfil evidenciando que o conector de 10 mm absorve maior parcela das tensões, resultando em um maior empenamento do conector e, conseqüentemente, maiores deslizamento do perfil, confirmando o comportamento notado na análise quanto ao deslizamento longitudinal e comprovando coerência nos resultados obtidos.

No que se refere a deformada dos conectores, a configuração obtida pela simulação obedece ao padrão obtido no modelo experimental comparativo. Tanto no desenho quanto em análise de simetria nas tensões de tração e compressão. O fato da maior deformada do conector ser verificada na sua base, tanto no modelo experimental quanto numérico, reforça o fato dessa região ser a mais solicitada, conforme análise numérica. E com isso, é possível atestar concordância no comportamento conseguido a partir na simulação.

Tendo em vista os aspectos mencionados, a estratégia de modelagem desenvolvida foi considerada adequada em relação ou objetivo inicial estabelecido. Principalmente por se tratar de um modelo reduzido e referir-se a um estudo numérico primitivo aplicado a um conector em fase de estudo, donde as primeiras análises experimentais foram apresentadas por Barbosa (2016).

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Considerando os estudos realizados nesta pesquisa sobre os conectores de cisalhamento treliçados com uma estratégia de modelagem simplificada, seguem os tópicos de relevância como sugestão para trabalhos futuros:

- Calibração do modelo simplificado para o regime plástico;
- Aplicação da estratégia de modelagem aqui desenvolvida em vigas mistas contínuas para uso cotidiano;
- Aplicação da metodologia de modelagem estudada em situações excepcionais como de incêndio, carregamentos cíclicos, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA, G. M. S. **Sobre o projeto de edifícios em estruturas mista aço-concreto**. São Carlos, 2000. 277p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18082006-143950/publico/2000ME_GersonMSAlva.pdf. Acesso em: 20 set. 2019

ALVA, G. M. S.; MALITE, M. **Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto**. Cadernos de Engenharia de Estruturas São Carlos, v. 7, n. 25, p. 51-84, 2005. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee25_51.pdf. Acesso em: 30 jul. 2019.

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

BARBOSA, W. C. S. **Estudo de conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas-mistas de aço-concreto**. Brasília, 2016, 511p. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/23188>
<https://repositorio.unb.br/handle/10482/23188>. Acesso em: 15 abr. 2019.

CALADO, L., SANTOS, J. **Estruturas mistas de Aço e Betão**. 3.ed. São Paulo: IST Press, 2013.

CAVALCANTE, O.R.O. **Estudo de Conectores de Cisalhamento do Tipo ‘V’ em Vigas Mistas**. Brasília, 2010, 192p. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/7890>. Acesso em: 15 abr. 2019

CHAPMAN, J.C; BALAKRISHNAN, S. **Experiments on composite beams**. The Structural Engineering, vol. 42(11), pp 369-383, 1964.

CHATER, L. **Estudo Numérico e Experimental de Conectores de Cisalhamento Feitos de Vergalhão CA-50 para Uso em Estrutura Mista de Aço-Concreto**. Brasília, 2015, 177p. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/19001>. Acesso em: 20 mai. 2019.

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

FERNANDES, S. A. **Análise das deformações do concreto e do comportamento de vigas submetidas a flexão simples**. São Carlos, 142p, 1996. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-02042018-110733/publico/Dissert_Fernandes_SolangeA.pdf. Acesso em: 02 ago. 2019.

GATTESCO, N. **Analytical modeling of nonlinear behavior of composite beams with deformable connection**, Journal of Constructional Steel Research, Italy, vol.52, pp 195-218, 1999.

KIRCHHOF. L.D. **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio**. São Carlos, 143p, 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee25_01.pdf. Acesso em: 01 abr. 2019.

KOTINDA. T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. São Carlos, 144p, 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2006. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-22062006-110301/publico/2006ME_TatiannelKotinda.pdf. Acesso em: 15 mar. 2019.

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

MALITE, M. **Análise do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada**. São Carlos, 2v, 1993. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1993.

OEHLERS, D.J, BRADFORD, M.A. **Steel and concrete composite structural members: fundamental behaviour**. Oxford, UK: Pergamon, 1995.

OLIVEIRA, L.A.F. **Estudo do comportamento e da resistência das vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis formados a frio e de lajes pré-fabricadas**. Belo Horizonte, 100p, 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUDB-8AMH4G/1/estudo_do_comportamento_e_da_resistencia..._luciano_augusto_figueiredo_de_oliveira.pdf. Acesso em: 22 mai. 2019.

OVEN, V.A., BURGESS, I.W., PLANK, R.J., ABUD WALI, A.A. **An analytical model for the analysis of composite beams with partial interaction**, *Computers & Structures*, Elsevier Science Ltda., v.62, n.3, pp 493-504, 1997.

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

SIMULIA. **Abaqus Theory Manual**. Abaqus Documentation. (2009). Disponível em: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/stm/default.htm?startat=ch04s05ath120.html>. Acesso em: 1 set. 2019.

SLUTTHER, R.G.; DRISCOLL, G.C. **Flexural strength of steel-concrete composite beams**. *Journal of the Structural Division* – ASCE, Proc., v.91, n STT2, p. 71-99, 1965.

TRISTÃO, G.A. **Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica**. São Carlos, 125p, 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee23_119.pdf. Acesso em: 03 mai. 2019.

VERÍSSIMO, G. S. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento**. Belo Horizonte, 2007, 290p. Tese de Doutorado em Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/LMCA-7E6HVC/1/11.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2019.

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

VIEST, I.M. **Composite Construction Recent Past, Present and Near Future Preceding** *os Composite Construction In Steel and Concrete II*. ASCE. New York, USA, 1992.