

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

SKARLLATT CORREIA ALVES

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE LAJES MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM E
SEM CONECTOR DE CISALHAMENTO**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

SKARLLATT CORREIA ALVES

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE LAJES MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM E
SEM CONECTOR DE CISALHAMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro

Coorientadores: Carol Ferreira Rezende Santos
José Maria Franco de Carvalho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A474e
2024
Alves, Skarllatt Correia, 1995-
Estudo paramétrico de lajes mistas de aço e concreto com e
sem conector de cisalhamento / Skarllatt Correia Alves. –
Viçosa, MG, 2024.
125 f.: il. (algumas color.).

Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2024.
Referências bibliográficas: f. 120-125.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.225>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Construção mista. 2. Lajes de concreto. 3. Aço -
Estruturas. 4. Cisalhamento. I. Ribeiro, José Carlos Lopes,
1977-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624.1821

SKARLLATT CORREIA ALVES

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE LAJES MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM E
SEM CONECTOR DE CISALHAMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 20 de fevereiro de 2024.

Assentimento:

Skarllatt Correia Alves
Autora

Prof. Dr. José Carlos Lopes Ribeiro
Orientador (DEC/UFV)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus por ter me dado vida, saúde, discernimento e resiliência, principalmente nos tempos mais difíceis.

Aos meus pais e irmã, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. E a Ana e a Maria por serem luz em meio ao caos.

À professora Carol Ferreira Rezende Santos, coorientadora deste trabalho, por todo o conhecimento inestimável fornecido e pela contínua disponibilidade para ajudar, além de toda paciência e orações.

Aos professores José Carlos Lopes Ribeiro e José Maria Franco de Carvalho, pela orientação e contribuição nesse trabalho.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, pela formação e oportunidade concedida.

Aos meus alunos, pela experiência de lecionar e pelas boas risadas que tornaram minha caminhada mais leve.

Aos meus amigos, pela companhia e aos colegas de mestrado pelas contribuições e trocas de experiência.

À CAPES – Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela bolsa de mestrado concedida.

À Universidade Federal de Viçosa, por ter sido casa ao longo de todos esses anos.

RESUMO

ALVES, Skarllatt Correia, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Estudo paramétrico de lajes mistas de aço e concreto com e sem conector de cisalhamento.** Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro. Coorientadores: Carol Ferreira Rezende Santos e José Maria Franco de Carvalho.

As lajes mistas de aço e concreto possuem três mecanismos responsáveis pela transferência de esforços na interface, os quais são: ligação química, por atrito e mecânica. A ligação mecânica é a mais importante delas e é resultado de mecanismos físicos, como as mossas e os conectores de cisalhamento. Apesar de atuarem na composição da viga mista, os conectores de cisalhamento contribuem para o aumento da capacidade última das lajes mistas, uma vez que restringem o livre deslizamento relativo entre os materiais. No entanto, essa contribuição é desconsiderada no dimensionamento das lajes mistas, o que se deve à falta de informações necessárias sobre como esses afetam a capacidade última das lajes. Em geral, o comportamento das lajes mistas é investigado a partir do ensaio de flexão a quatro pontos, o que resulta em elevado consumo de recursos financeiros e tempo para confecção de protótipos. Por isso, modelos numéricos são uma alternativa para avaliação da influência de determinados parâmetros na capacidade última das lajes, pois, depois de calibrados e validados, são capazes de simular os comportamentos global e local das lajes mistas de aço e concreto, além de permitir a avaliação de uma maior quantidade de protótipos com menor custo. Nesse sentido, esse trabalho se dedicou a realizar um estudo paramétrico, avaliando a influência de propriedades geométricas e mecânicas no comportamento e, por consequência, na capacidade últimas de lajes mistas de aço e concreto com e sem conectores de cisalhamento, utilizando fôrmas de perfis trapezoidais e reentrantes. O modelo numérico foi desenvolvido no software Abaqus e as propriedades não lineares dos materiais e da interface foram considerados. A força resistente ao cisalhamento longitudinal foi avaliada de acordo com modelos normatizados presentes na literatura. Dentre os principais resultados, observa-se a contribuição dos conectores na capacidade última, a influência do vão de cisalhamento e da altura da laje de concreto nas lajes com e sem conectores, além da contribuição do perfil da fôrma reentrante que, através do efeito de confinamento do concreto em suas nervuras, permitem que a laje alcance maior capacidade última.

Palavras-chave: Lajes mistas; Interface aço-concreto; Cisalhamento longitudinal; Conectores de cisalhamento; Capacidade última.

ABSTRACT

ALVES, Skarllatt Correia, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February de 2024. **Parametrics study of composite slabs with and without shear conector.** Advisor: José Carlos Lopes Ribeiro. Co-advisors: Carol Ferreira Rezende Santos e José Maria Franco de Carvalho.

Composite slabs have three mechanisms responsible for transferring stress at the interface, which are: chemical, frictional and mechanical bonding. The mechanical connection is the most important of these and is the result of physical mechanisms such as embossments and shear connectors. Despite composite acting in the composite beam, it is known that shear connectors contribute to increasing the ultimate capacity of composite slabs, as they restrict the relative free sliding of the interface. However, this contribution is disregarded in the design of composite slabs, which is due to the lack of necessary information on how they affect the ultimate capacity of the slabs. In general, the behavior of composite slabs is investigated using the four-point bending test, which results in a high consumption of financial resources and time to manufacture prototypes. Therefore, numerical models are an alternative for evaluating the influence of certain parameters on the ultimate capacity of slabs because, calibrated and validated, they are capable of simulating the global and local behaviors of composite steel and concrete slabs, in addition to allowing the evaluation of a greater number of prototypes with less financial expense. In this sense, this work was dedicated to carrying out a parametric study, evaluating the influence of geometric and mechanical properties on the behavior and, consequently, on the ultimate capacity of composite steel and concrete slabs with and without shear connectors, using trapezoidal profile formwork and reentrants. The numerical model was developed in Abaqus software, and the nonlinear properties of the materials and the interface were considered. The strength resistant to longitudinal shear was evaluated according to standardized models present in the literature. Among the main results, the contribution of the connectors to the ultimate capacity, the influence of the shear span and the height of the concrete slab in slabs with and without connectors, in addition to the contribution of the profile of the re-entrant formwork which, through the effect of confinement of the concrete in its ribs, allows the slab to reach greater ultimate capacity.

Keywords: Composite slabs; Steel-concrete interface; Longitudinal shear; Shear connectors; Ultimate capacity.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A_f	Área nominal da seção transversal da fôrma de aço
b	Largura da laje mista
D	Diâmetro do conector
d_f	Profundidade efetiva da laje mista
d_p	Distância da zona de compressão até o centroide da fôrma
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_{cm}	Módulo de elasticidade inicial do concreto
E_{c1}	Módulo de elasticidade para tensão máxima do concreto
E_s	Módulo de elasticidade do aço
E_{sc}	Módulo de elasticidade do conector.
f_{bm}	Tensão de pico à compressão do concreto
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_y	Resistência ao escoamento da fôrma de aço
f_{yc}	Resistência ao escoamento do conector
h	Altura da laje de concreto
h_c	Altura do conector de cisalhamento
K	Razão entre o segundo invariante de tensão no meridiano de tração e compressão
k_{ij}	Coefficiente de rigidez
k_{nn}	Coefficiente de rigidez na direção normal
k_{ss}	Coefficiente de rigidez na direção cisalhante
k_{tt}	Coefficiente de rigidez na direção cisalhante
L	Comprimento efetivo da laje mista
L_s	Vão de cisalhamento
M_{rd}	Momento fletor resistente de cálculo
n	Número de conectores
N_v^c	Resistência de projeto de um conector
$P_{pb,Rd}$	Resistência ao rasgo da fôrma de aço
t	Espessura da fôrma de aço

V_a	Força de resistência ao cisalhamento longitudinal dos conectores de cisalhamento
V_u	Força de resistência ao cisalhamento longitudinal de cálculo
V_{us}	Força de resistência ao cisalhamento longitudinal da laje mista com conectores
x	Profundidade da zona de compressão no concreto
x_{pl}	Distância da linha neutra plástica no bloco de concreto à face superior de uma laje mista
ε_{cr}	Deformação de pico do concreto
ε_n	Deformação nominal na direção normal
ε_s	Deformação nominal na direção cisalhante
ε_t	Deformação nominal na direção cisalhante
δ_n	Deslocamento na direção normal
δ_s	Deslocamento na direção cisalhante
δ_t	Deslocamento nominal na direção cisalhante
ψ	Ângulo de dilatância
μ	Parâmetro de viscosidade

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
CDP	Concrete Damage Plasticity
ECC	Engineered Cementitious Composite

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL.....	10
1.1. Introdução	11
1.2. Informações gerais sobre lajes mistas de aço e concreto	13
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo geral.....	15
1.3.2. Objetivos específicos.....	15
1.4. Organização do trabalho	15
CAPÍTULO 2. ESTUDO PARAMÉTRICO E ANALÍTICO DE LAJES MISTAS DE AÇO E CONCRETO SEM CONECTOR DE CISALHAMENTO	17
2.1. Introdução	18
2.2. Revisão de literatura.....	21
2.2.1. Revisão sistemática	21
2.2.2. Comportamento das lajes mistas	24
2.2.3. Modelagem numérica	31
2.3. Desenvolvimento do modelo numérico.....	34
2.3.1. Modelo constitutivo dos materiais.....	35
2.3.2. Condições de contorno	37
2.3.3. Interações de contato	38
2.3.4. Malha em elementos finitos.....	39
2.3.5. Validação do modelo numérico.....	43
2.4. Estudo paramétrico.....	46
2.4.1. Relação entre o momento fletor resistente e o momento de plastificação da seção mista	49
2.4.2. Vão de cisalhamento (L_s).....	51
2.4.3. Espessura da fôrma de aço (t).....	54
2.4.4. Altura da laje de concreto (h)	56
2.4.5. Resistência à compressão do concreto (f_c).....	58
2.4.6. Resistência ao escoamento da fôrma de aço (f_y).....	60
2.5. Conclusão.....	61
CAPÍTULO 3. ESTUDO PARAMÉTRICO E ANALÍTICO DA INFLUÊNCIA DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO NA CAPACIDADE ÚLTIMA DE LAJES MISTAS DE AÇO E CONCRETO	63
3.1. Introdução	64
3.2. Revisão de literatura.....	66
3.2.1. Análise bibliométrica.....	66
3.2.2. Comportamento das lajes mistas sem conector	70
3.2.3. Lajes mistas com conector de cisalhamento	74
3.3. Modelo numérico	84
3.3.1. Geometria dos modelos com conectores de cisalhamento.....	84
3.3.2. Comportamento mecânico dos materiais.....	87
3.3.3. Geometria e condições de contorno.....	88
3.3.4. Malha dos modelos numéricos	89

3.3.5. Interações	91
3.3.6. Validação dos modelos numéricos	92
3.4. Estudo paramétrico.....	95
3.5. Resultados	99
3.5.1. Modelos analíticos.....	99
3.5.2. Vão de cisalhamento.....	102
3.5.3. Altura do conector e altura da laje.....	104
3.5.4. Diâmetro do conector e espessura da fôrma	107
3.5.5. Resistência a compressão e módulo de elasticidade.....	112
3.5.6. Número de conectores de cisalhamento	114
3.6. Conclusão.....	116
CAPÍTULO 4. CONCLUSÃO GERAL.....	118
4.1. Considerações gerais.....	118
4.2. Sugestões para estudos futuros.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Introdução

Os primeiros relatos sobre a utilização de chapas de aço como fôrmas para laje de concreto datam da década de 30, nos Estados Unidos (PATRICK, BRIDGE, 2002). Nessa primeira abordagem, o aço era utilizado apenas como fôrma permanente, de modo que não havia comportamento misto entre os materiais e, por isso, cada material trabalhava separadamente. Como resultado, a capacidade última do sistema era definida pela capacidade última do material menos resistente. Na década de 60, foram inseridas mossas nas chapas de aço, tornando possível o desenvolvimento do comportamento misto. No comportamento misto, a chapa de aço atua como armadura positiva da laje de concreto, o que promove o aumento da capacidade última do sistema (FERRER; MARMON; CASAFONT, 2018).

Com o desenvolvimento do comportamento misto, as lajes mistas se tornaram vantajosas tanto economicamente quanto tecnicamente, fazendo com que houvesse aumento em sua utilização como sistema de piso (GROSSI, 2016). Atualmente, esse elemento estrutural corresponde ao sistema de piso mais utilizado em edifícios mistos. Segundo dados do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) de 2019, as lajes mistas de aço e concreto corresponderam a 4,4% do total de lajes projetadas no Brasil, em que sua principal utilização consiste em sistema de piso de edifício comerciais. Dados do CBCA de 2022 indicam um aumento de produção em relação aos anos anteriores, resultando no volume de produção de 11,5 mil toneladas.

A utilização desse sistema estrutural se deve às suas ótimas características técnicas e construtivas, em que a principal vantagem técnica consiste no maior aproveitamento da resistência mecânica dos materiais. O maior aproveitamento resulta da melhor distribuição de esforços na seção transversal, o que resulta no aumento da capacidade última quando comparado a sistemas de piso convencionais (lajes de concreto armado). Como vantagem construtiva, destacam-se: velocidade de execução, menor produção de resíduos e não necessidade do uso de escoramento.

No Brasil, atualmente, a norma vigente para definição dos critérios de projeto de lajes mistas de aço e concreto em temperatura ambiente é a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 8800 (ABNT 2008). Na norma técnica são apresentados dois métodos para avaliação da capacidade última de lajes mistas sem conector de cisalhamento, são eles, o Método da Interação Parcial e o Método m-k. Em ambos os métodos é necessário a realização de ensaios experimentais para ajustes dos parâmetros de interface.

Devido ao elevado custo dos ensaios experimentais, muitos autores têm recorrido ao uso de modelos numéricos para avaliação da capacidade última das lajes mistas. Esses modelos desde que calibrados e validados, são capazes de simular os comportamentos globais e locais das lajes mistas de aço e concreto. Ao longo dos anos diferentes estudos foram conduzidos, a fim de identificar os parâmetros que mais influenciam no comportamento das lajes mistas de aço e concreto, os principais correspondem a espessura e configuração geométrica da fôrma de aço, esbeltez da laje e tipo de concreto, dentre outros. Os estudos não foram conclusivos em função da pequena quantidade de protótipos experimentais.

Uma área pouco explorada dentro do contexto das lajes mistas, consiste no comportamento de lajes mistas com conectores de cisalhamento. Acredita-se que essa limitação esteja atrelada à baixa disponibilidade de resultados experimentais. Como resultado, não há nenhuma recomendação normativa quanto a consideração da contribuição dos conectores de cisalhamento para a capacidade última das lajes mistas. Apesar do baixo número de estudos, sabe-se que os conectores de cisalhamento promovem aumento da resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas, logo podem contribuir para o aumento da capacidade última desses elementos. Assim, sua consideração no comportamento global e local das lajes mistas poderia conduzir a um consumo mais eficiente dos materiais.

Com o objetivo de avaliar a contribuição dos conectores de cisalhamento para a resistência ao cisalhamento longitudinal da interface aço-concreto, esse trabalho se propôs a realizar um estudo paramétrico de lajes mistas com conectores de cisalhamento, onde diferentes parâmetros geométricos e mecânicos foram investigados. Além das lajes com conectores, foi realizado também o estudo paramétrico de lajes sem conectores de cisalhamento, a fim de possibilitar a comparação do efeito causado pelos conectores de cisalhamento. As principais variáveis estudadas correspondem: espessura da fôrma de aço, altura de laje de concreto, comprimento do vão de cisalhamento, resistência à compressão do concreto e adiciona-se ao estudo das lajes com conectores a investigação da influência da altura, diâmetro e quantidade do conector de cisalhamento.

Para realização dos estudos paramétricos foram desenvolvidos modelos numéricos de lajes com e sem conectores de cisalhamento com fôrma de aço de perfil trapezoidal e reentrante. A escolha de perfis de fôrma diferente permitiu investigar a contribuição da geometria da fôrma na capacidade resistente das lajes mistas. Nos modelos numéricos desenvolvidos foram consideradas as não-linearidades físicas e mecânica dos materiais que compõem as lajes mistas e o comportamento não linear da interface.

1.2. Informações gerais sobre lajes mistas de aço e concreto

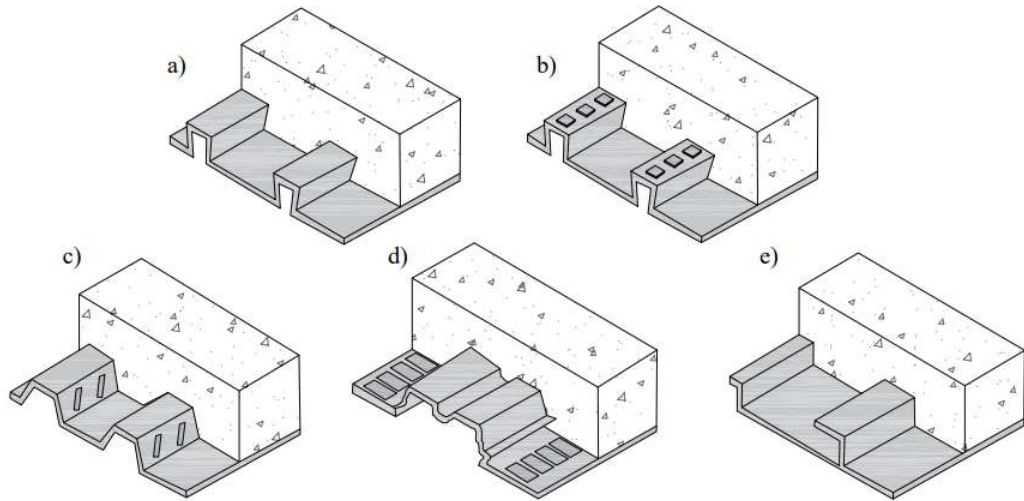
As lajes mistas de aço e concreto são compostas por uma laje de concreto moldada *in loco* e uma fôrma de aço formada a frio que permanece incorporada à laje após a cura do concreto. É comum a incorporação de uma malha de aço na parte superior da laje de concreto, a fim de combater efeitos de fluência e retração do concreto.

Em edifícios mistos, a viga mista associada a laje mista compõe o sistema de piso misto. Esses dois elementos estruturais são conectados por conectores de cisalhamento posicionados no topo da viga e na extremidade da fôrma de aço. Nesse caso, o conector contribui para o aumento da resistência da interface aço concreto das lajes mistas.

A configuração mista é resultado de mecanismos presentes na interface aço-concreto que permitam a transferência dos esforços longitudinais, a saber: químicos (aderência), mecânicos (mossas e conectores) e físicos (atrito). Segundo a ABNT NBR 8800:2008, só é possível admitir o comportamento misto após o concreto atingir 75% da resistência à compressão especificada. Antes disso, a fôrma de aço deve ser capaz de suportar isoladamente às ações de serviço e devido ao peso próprio.

Em termos de configuração, as fôrmas de aço são classificadas de acordo com a geometria da seção transversal, com as fôrmas trapezoidais e reentrantes sendo as mais comuns. Os perfis trapezoidais possuem seção aberta e podem ter formas como mostradas na Figura 1.1 (b), (c) e (d). Por outro lado, a geometria dos perfis reentrantes, ilustradas na Figura 1.1 (a) e (e), permitem o confinamento do concreto no interior das suas nervuras. Além da geometria, espessura e altura da fôrma que podem variar, é possível ter diferentes padrões de mossas. As mossas podem variar em geometria, profundidade, inclinação e tamanho. Não há normatização sobre as características das mossas, essa tipologia é proposta por cada fornecedor e sua eficiência é garantida através de estudos experimentais.

Figura 1.1 – Exemplo de configuração de fôrmas em lajes mistas.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2020).

Em geral, o comportamento da interface aço-concreto pode ser estudado a partir de ensaios de cisalhamento direto (YI et al, 2020). A capacidade última e, por consequência, os modos de falha, são investigados através do ensaio a flexão (RIOS et al., 2017; CIFUENTES, MEDINA, 2013). Isso ocorre, pois nos ensaios à flexão é possível reproduzir os efeitos da força normal e da curvatura assumida pela laje na flexão, de modo que o comportamento experimental se assemelhe ao das lajes em serviço.

A partir do ensaio de flexão, foram identificados três diferentes modos de falha nas lajes mistas, são eles: falha a flexão, ao cisalhamento vertical e ao cisalhamento longitudinal. A falha a flexão é evidenciada pela plastificação dos materiais na região de momento fletor máximo. A falha ao cisalhamento vertical ocorre devido a ação da força cortante, levando ao aparecimento de fissuras nas regiões próximas ao apoio (SHIRGAONKAR; PATIL, Y.D; PATIL, H.S, 2021; SIMON; VISUVASAM; BABU, 2017). A falha por cisalhamento longitudinal é evidenciada pela falha da interface aço concreto, que resulta no deslizamento relativo entre os materiais (BAI et al, 2020; MOHAMMED et al, 2016; AHMED; TSVDARIDIS, 2019; SHIRGAONKAR; PATIL, Y.D;PATIL, H.S, 2021; ABDULLAH; EASTERLING, 2009).

Diversos trabalhos na literatura (RIOS et al, 2017; FERRER et al., 2007; BAI et al., 2020; HOSSAIN; ATTARDE; ANWAR, 2019; LI et al., 2017; SOLTANALIPOUR et al., 2019), avaliaram o comportamento global e local das lajes mistas. A partir desses estudos, foi observado que diferentes variáveis influenciam nesse comportamento, como por exemplo a espessura e configuração geométrica da fôrma de aço, esbeltez da laje, tipo de concreto,

dentre outros. Contudo, a realização dessa investigação através de campanhas experimentais limita a pesquisa uma vez que envolve o consumo de recursos financeiros para produção de protótipos e tempo gasto em laboratório.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo paramétrico, a fim de avaliar a influência de diversas variáveis, geométricas e mecânicas, no comportamento das lajes mistas de aço e concreto com e sem conector de cisalhamento. Para isso, foi desenvolvido um modelo numérico acurado capaz de reproduzir o que ocorre em lajes mistas quando submetidas a ensaios experimentais, que levam em consideração o comportamento não linear da interface aço-concreto e dos materiais que compõe a laje mista.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Esse trabalho teve como objetivo a avaliação da influência de conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça nos comportamentos global e local das lajes mistas e na resistência ao cisalhamento longitudinal da interface aço e concreto.

1.3.2. Objetivos específicos

No intuito de alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver e validar modelos numéricos em elementos finitos de lajes mistas com diferentes esbeltezes para lajes mistas com e sem conector de cisalhamento;
- Identificar as variáveis que afetam o comportamento das lajes mistas de aço e concreto sem conectores de cisalhamento;
- Identificar as variáveis que afetam o comportamento das lajes mistas de aço e concreto com conectores de cisalhamento.

1.4. Organização do trabalho

Essa dissertação está organizada em quatro capítulos. O primeiro capítulo dedica-se a introduzir e contextualizar o tema e apresentar os objetivos deste trabalho.

O segundo capítulo apresenta o estudo paramétrico de lajes mistas sem conectores de cisalhamento e encontra-se dividido em uma revisão bibliográfica sistematizada sobre lajes mistas sem conectores de cisalhamento, desenvolvimento dos modelos numéricos,

identificação das variáveis investigadas e apresentação dos resultados e conclusões do estudo paramétrico.

No terceiro capítulo é apresentado o estudo paramétrico de lajes mistas com conectores de cisalhamento e encontra-se dividido em: revisão sistematizada sobre lajes mistas com conectores de cisalhamento, desenvolvimento dos modelos numéricos, identificação das variáveis investigadas e apresentação dos resultados e conclusões do estudo paramétrico.

No quarto e último capítulo, são resumidas as principais conclusões obtidas a partir dos estudos paramétricos e apresentadas sugestões para trabalhos no futuro.

CAPÍTULO 2. ESTUDO PARAMÉTRICO E ANALÍTICO DE LAJES MISTAS DE AÇO E CONCRETO SEM CONECTOR DE CISALHAMENTO

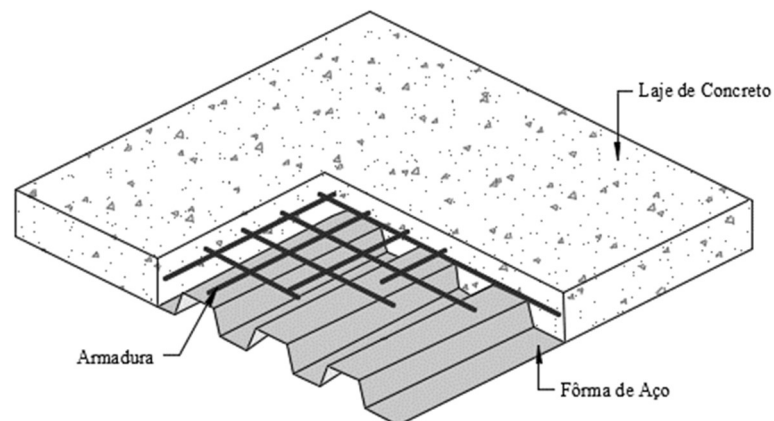
Resumo

Modelos numéricos podem ser utilizados na investigação dos parâmetros que afetam o comportamento global e local das lajes mistas de aço e concreto. Através do modelo computacional é possível investigar uma grande quantidade de parâmetros que experimentalmente resultaria em elevados gastos financeiros e em tempo de laboratório. Nesse sentido, esse trabalho se propôs a investigar a influência de fatores geométricos e propriedades mecânicas dos materiais no comportamento e, por consequência, na capacidade última das lajes mistas de aço e concreto. A resistência ao cisalhamento longitudinal foi avaliada de acordo com o modelo normativo para lajes mistas dúcteis e frágeis, método m-k, presente na ABNT NBR 8800 (2008) e no Eurocode 4:1994. Dentre os resultados obtidos, destaca-se que o vão de cisalhamento, a altura da laje de concreto e o tipo de perfil da fôrma de aço contribuem para o aumento da capacidade última das lajes mistas de aço e concreto.

2.1. Introdução

A laje mista de aço e concreto é um elemento estrutural utilizado comumente como sistema de piso de edifícios metálicos e misto (SOLTANALIPOUR et al., 2022). Ela é formada pela associação de uma laje de concreto moldada in loco e uma fôrma de aço formada a frio, que permanece incorporada ao conjunto após a cura do concreto (GROSSI et al., 2020; HOSSAIN et al., 2016; JIANG et al., 2019; LIM et al., 2021). Após a cura do concreto, a fôrma atua como armadura positiva, suportando os esforços de tração, e a laje de concreto aos esforços de compressão. Além da fôrma de aço e da laje de concreto, é comum a incorporação de uma malha de aço posicionada na parte superior da laje de concreto no intuito de minimizar os efeitos de fluência e retração no concreto, Figura 2.1.

Figura 2.1- Exemplo de configuração de laje mista aço-concreto.



Fonte: O autor.

Nesse sistema, a fôrma de aço e a laje de concreto trabalham em conjunto, resultando em uma melhor distribuição dos esforços solicitantes na seção transversal e, por consequência, no melhor comportamento estrutural. Nesse sentido, destaca-se como vantagens técnicas e construtivas desse sistema a boa capacidade resistente, o menor consumo de materiais, a eliminação do uso de escoramentos, a maior durabilidade e a maior velocidade de construção (BAI et al., 2020; PEREIRA et al., 2017; PEREIRA et al., 2019; MARIMUTHU et al., 2007; LI et al., 2017; SIMON et al., 2017; MOHAMMED et al., 2016). Por outro lado, a possibilidade de corrosão da fôrma, caso não tratada corretamente, e o maior custo, quando comparado ao sistema convencional de concreto, podem ser apontados como desvantagem desse sistema (LIM et al., 2021).

Diferentes configurações para a fôrma de aço já foram propostas na literatura (FERRER et al., 2018; WANG et al., 2020). Contudo a configuração trapezoidal e reentrante corresponde aos perfis comumente adotados na literatura (LIM et al., 2021; SOLTANALIPOUR et al., 2022). Os perfis trapezoidais possuem seção aberta, enquanto os perfis reentrantes, devido a geometria de sua seção transversal, permitem o confinamento do concreto no interior das suas nervuras e aumentam a resistência ao cisalhamento longitudinal na interface aço-concreto.

A resistência ao cisalhamento longitudinal da interface aço-concreto afeta diretamente o desempenho estrutural, a resistência, a rigidez e o modo de ruptura das lajes mistas (AHMED; TSVDARIDIS, 2019). Dado a resistência ao cisalhamento longitudinal as lajes mistas têm-se o desenvolvimento do comportamento misto.

O comportamento misto das lajes mistas é caracterizado pela transferência de esforços entre a fôrma e a laje de concreto e só é possível devido aos mecanismos presentes na interface aço-concreto. Esses mecanismos resultam nas ligações químicas, por atrito e mecânica (GHOLAMHOSEINI et al., 2014; MISTAKIDIS; DIMITRIADIS, 2008). A ligação química é resultado da aderência química entre a pasta de cimento e a fôrma de aço, a ligação por atrito é devido as rugosidades presentes nas superfícies dos materiais e é mobilizada a partir do início do deslizamento relativo; a ligação mecânica ocorre por meio de mecanismos físicos que devem estar presentes na interface, como as mossas e ancoragem de extremidade.

Dentre os mecanismos apresentados, as mossas são extremamente importantes para o comportamento misto, sobretudo, nas lajes sem conectores. Isso se deve ao fato de que elas dificultam o livre deslizamento relativo entre o aço e o concreto. Diferentes estudos na literatura investigaram as tipologias das mossas (FERRER et al., 2007; FERRER et al., 2018; SIMON et al., 2017, SOLTANALIPOUR et al., 2022). Dentre os resultados observados, Ferrer et al (2007) destaca que modificar a inclinação das mossas presentes na onda alta da fôrma resulta em uma maior resistência ao cisalhamento longitudinal; por outro lado, Simon et al (2017) destaca que a geometria das mossas possui, também, grande influência no desempenho das lajes mistas.

A capacidade última das lajes mistas é comumente avaliada a partir de ensaios de flexão a quatro pontos, pois nesse tipo de ensaio é possível a reprodução dos efeitos da força normal e da curvatura assumida pela laje na flexão (RIOS et al., 2017; CIFUENTES; MEDINA, 2013; YI et al., 2020). Do ensaio de flexão a quatro pontos, é possível identificar os três principais modos de falha das lajes mistas, são eles, cisalhamento longitudinal,

cisalhamento vertical e por flexão (SOLTANALIPOUR et al., 2022). Dentre eles, a falha por cisalhamento longitudinal é a mais comum para as lajes com comprimentos usuais (BAI et al., 2020; AHMED e TSAVDARIDIS, 2019; PEREIRA et al., 2019; MOHAMMED et al., 2016; GHOLAMHOSEINI et al., 2014; SIMON et al., 2017; CIFUENTES; MEDINA, 2013).

Na falha por cisalhamento longitudinal, o esgotamento da capacidade resistente da interface aço concreto ocorre antes da plastificação da seção mista. Nela, observa-se um deslizamento relativo considerável entre a fôrma de aço e a laje de concreto (BAI et al., 2020; MOHAMMED et al., 2016; AHMED e TSAVDARIDIS, 2019; SHIRGAONKAR et al., 2021; ABDULLAH; EASTERLING, 2009). A falha por flexão ocorre quando a interface possui resistência suficiente para que ocorra a plastificação da seção transversal, por consequência, o momento fletor resistente é igual ao momento que provocaria a plastificação da seção. A falha cisalhamento vertical é comum em lajes com vãos curtos e com elevado carregamento próximo aos apoios. Esse modo de falha é evidenciado pela formação de fissuras que irão restringir a zona de compressão até que a capacidade máxima de resistência ao cisalhamento seja atingida (HARTMEYER e KURZ, 2013).

Na literatura existem trabalhos que investigaram a influência de parâmetros geométricos e mecânicos nos comportamentos local e global das lajes mistas (RIOS et al., 2017; FERRER et al., 2007; BAI et al., 2020; HOSSAIN et al., 2016; HOSSAIN et al., 2019; SOLTANALIPOUR et al., 2019; SOLTANALIPOUR et al., 2022; GHOLAMHOSEINI et al., 2014). Dos estudos observa-se que nas lajes mistas biapoiadas sem conectores de cisalhamento e com falha por cisalhamento longitudinal, os principais parâmetros que afetam a capacidade última das lajes mistas são: espessura e configuração geométrica da fôrma (trapezoidal ou reentrante), vão de cisalhamento, características (geometria e disposição) das mossas, tipo de concreto e presença ou não de dispositivos de ancoragem.

Apesar de existirem resultados experimentais sobre tais parâmetros, as conclusões obtidas são baseadas em um pequeno número de ensaios experimentais, o que pode não ser representativo. Uma forma de contornar tal limitação, consiste na utilização de modelos numéricos, os quais podem ser investigados em estudos paramétricos, permitindo a análise de uma grande quantidade de variáveis.

Diferentes modelos numéricos de lajes mistas de aço e concreto foram propostos na literatura (BAI et al., 2020; MOHAMMED et al., 2016; SHIRGAONKAR et al., 2021; ABDULLAH; EASTERLING, 2009; HOSSAIN et al., 2019; SOLTANALIPOUR et al., 2022; GHOLAMHOSEINI et al., 2014), contudo, tais modelos ainda são limitados, pois, em

geral, desconsideraram o comportamento não-linear da interface e/ou o comportamento não-linear dos materiais, tornando os modelos não representativos.

Dentro do contexto apresentado, esse trabalho se propõe a realizar um estudo paramétrico, a fim de investigar as variáveis que possuem influência no comportamento e, por consequência, na capacidade última das lajes mistas. Desse modo, as variáveis investigadas correspondem ao vão de cisalhamento, espessura da fôrma de aço, altura da laje de concreto, resistência a compressão do concreto e resistência ao escoamento da fôrma de aço. As lajes mistas foram avaliadas com fôrmas em perfil trapezoidal e reentrante, a fim de compreender o efeito dos parâmetros destacados em cada tipologia das lajes mistas e, também, a contribuição da fôrma na capacidade resistente. Assim, foram desenvolvidos modelos numéricos baseados em lajes biapoiadas sem conectores de cisalhamento com perfis reentrantes e trapezoidais.

2.2. Revisão de literatura

2.2.1. Revisão sistemática

O comportamento da produção científica e o interesse da comunidade acadêmica referente às lajes mistas de aço e concreto foram avaliados a partir da análise bibliométrica de artigos científicos relacionados ao tema.

A análise foi baseada nos resultados bibliográficos obtidos no Science Direct, base de dados da Elsevier. Em seguida, os resultados foram selecionados e extraídos utilizando o software de acesso livre StArt[®], desenvolvido na Universidade Federal de São Carlos.

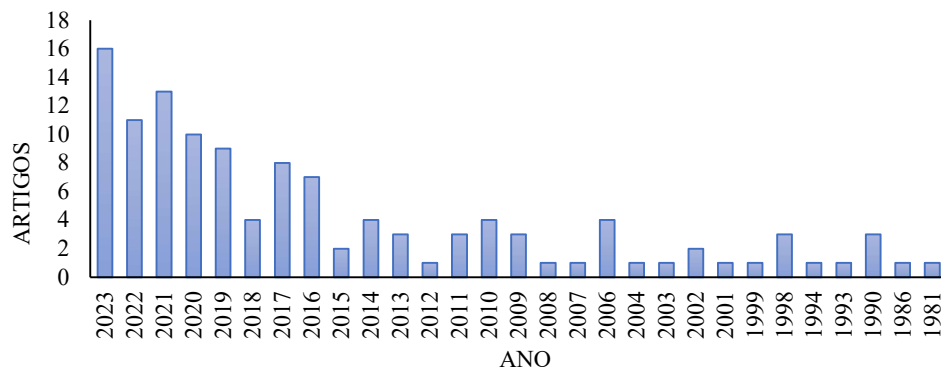
A análise bibliométrica realizada no software StArt[®] é realizada em três etapas: planejamento, execução e sumarização. Na etapa de planejamento são definidos os protocolos de seleção dos artigos, como palavras-chaves a serem implementadas na base de dados escolhida e critérios de seleção e exclusão de artigos na etapa de execução. Na fase de execução, os artigos devem ser selecionados e, em seguida extraídos, de acordo com os parâmetros definidos na etapa protocolar. Por último, na etapa de sumarização é possível gerar gráficos e analisar o resultado das etapas anteriores.

Na etapa de seleção, foi definido como critério de aceitação, artigos que abordassem sobre lajes mistas, caso contrário deveria ser rejeitado. Para etapa de execução, o critério de aceitação estava relacionado a estudos relacionados aos comportamentos global e local de lajes mistas sem conectores de cisalhamento. Qualquer linha de pesquisa diferente, tornava o artigo rejeitado nessa etapa.

Inicialmente, definiu-se na etapa protocolar as palavras-chaves e estas foram introduzidas utilizando a fórmula *TITLE-ABS-KEY* na base de dados da *Scopus: composite slabs AND finite element analysis OR finite modelling AND longitudinal shear behavior OR longitudinal failure AND failure mode*". Com esse parâmetro de entrada, foi encontrado 2294 artigos entre o período de 1981 até o ano de 2023. Na fase de seleção, foi observado que grande parte dos textos estavam sendo rejeitados por se tratarem sobre vigas mistas, e, por esse motivo, optou-se por redefinir as palavras chaves utilizadas na busca.

Assim, uma nova pesquisa foi realizada e novas palavras chaves foram adotadas, são elas: *composite slab NOT composite beams NOT composite columns AND shear OR shear bond behaviour OR longitudinal shear behaviour*. Nesse caso, foram encontrados 172 artigos, sendo 52 rejeitados, em sua maioria, por se tratar de pilar misto e viga mista. Os 120 artigos restantes, publicados entre 1981 e 2023 conforme distribuição ilustrada na Figura 2.2, abordavam diferentes temas dentro do macro tema das lajes mistas de aço e concreto.

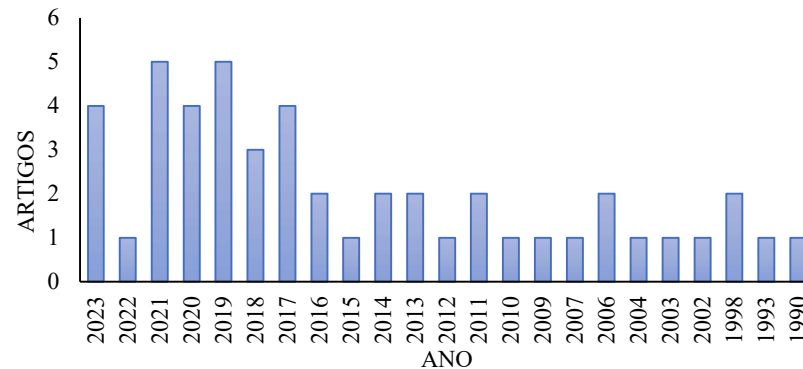
Figura 2.2 – Número de publicações por ano aceitas na fase de seleção.



Fonte: O autor.

Os 120 artigos foram conduzidos para a etapa de execução, os quais foram avaliados a fim de identificar aqueles que tivessem afinidade com o tema dessa pesquisa. Assim, foram selecionados apenas aqueles cujo foco consistia na análise do comportamento global e local de lajes mistas sem conectores de cisalhamento. Esta etapa resultou em 48 publicações, cuja distribuição ao longo dos anos está indicada na Figura 2.3. Os artigos que foram rejeitados nessa etapa estavam relacionados ao estudo de diafragma, análise de lajes mistas em situação de sismos e de incêndio, efeitos de fluência, retração e fadiga nas lajes mistas.

Figura 2.3 – Número de publicações por ano aceitas na fase de extração.



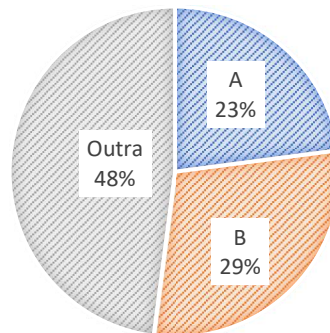
Fonte: O autor.

A Figura 2.3 indica um aumento de pesquisas envolvendo o comportamento global e local de lajes mistas nos últimos anos. Após análise das 48 publicações selecionadas na fase de extração, observa-se que 16 artigos (33,3% das publicações), 11 deles publicados entre 2018 e 2023, abordam o estudo de lajes mistas com concretos não convencionais. Esse resultado demonstra o interesse na busca por materiais alternativos para compor as lajes mistas.

Sobre os 11 artigos encontrados, os principais estudos estão relacionados aos concretos: *Engineered Cementitious Composite (ECC)* (31,3% dos artigos), concreto com borracha (25% dos artigos) e concreto com agregado leve (25% dos artigos). O estudo de diferentes concretos junto a laje mista, tem como intuito melhorar o comportamento estrutural das lajes mistas e aumentar a capacidade última.

A sumarização dos 48 artigos relacionados ao comportamento global e local das lajes mistas mostrou que as principais publicações estão nos periódicos *Journal of Constructional Steel Research (A)* e *Engineering Structures (B)*, como mostrado na Figura 2.4.

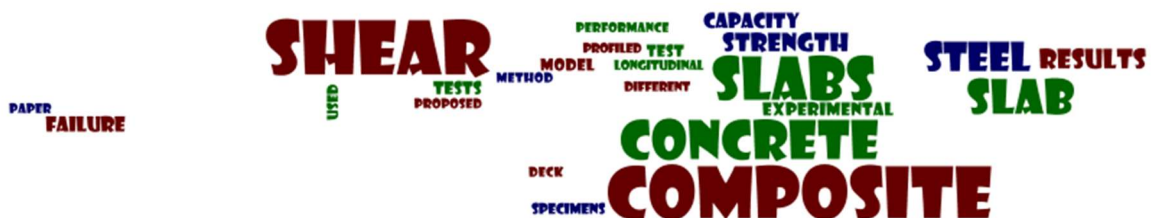
Figura 2.4 – Distribuição dos artigos aceitos na etapa de extração por periódico.



Fonte: O autor.

A sumarização dos resultados do software StArt[®], indica que as palavras que mais apareceram no *abstract* dos artigos aceitos na etapa de execução correspondem a nuvem de palavras apresentada na Figura 2.5. Dentre essas, destaca-se *composite slab* e *longitudinal shear*, o que indica maior número de pesquisas sobre o comportamento da interface aço-concreto das lajes mistas.

Figura 2.5 – Palavras-chave reportadas pelo software StArt[®].



Fonte: Software StArt[®].

2.2.2. Comportamento das lajes mistas

2.2.2.1. Interface aço concreto

Para que ocorra o comportamento misto, é necessário que existam na interface mecanismos capazes de impedir o livre deslizamento entre a fôrma de aço e a laje de concreto (FERRER et al., 2007; DANIELS; CRISINEL, 1993; CHEN; SHI, 2011). Esses mecanismos podem ser classificados em três tipos: ligação por atrito, ligação química e ligação mecânica.

A ligação química ocorre devido a aderência química entre a pasta de cimento e a fôrma de aço, sendo a mais frágil dentre os outros tipos de ligação. Por esse motivo, nos projetos de engenharia, é recomendado desconsiderar sua contribuição para a resistência ao

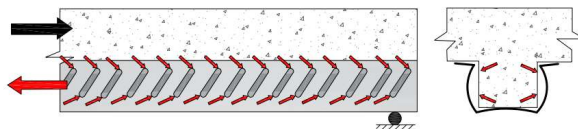
cisalhamento longitudinal, como indicam as normas EN 1994-1-1:2004 (EN-4) e ABNT NBR 8800:2008 (ABNT, 2008). Sua falha indica o início do deslizamento relativo entre a laje de concreto e a fôrma metálica (BURNET; OEHLERS, 2001; FERRER et al., 2007).

A ligação por atrito é resultado das rugosidades presentes na superfície da fôrma e da laje de concreto e será mobilizada a partir do início do deslizamento relativo entre os materiais. Essa ligação é proporcional às forças normais, devido à sobrecarga e ao peso próprio, que atuam perpendicularmente à interface (DANIELS; CRISINEL, 1993; CHEN, 2011).

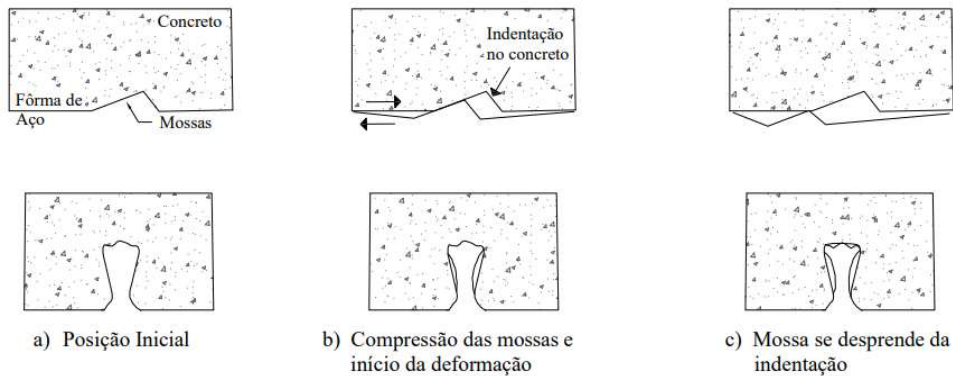
A ligação mecânica é resultado da presença de mecanismos como as mossas, a geometria da seção transversal da fôrma e as ancoragens de extremidade. Todos esses mecanismos dificultam o deslizamento relativo entre a fôrma e a laje de concreto, contribuindo assim para o aumento da capacidade última das lajes mistas.

No contexto das mossas, após a ruptura da adesão, surgem forças de compressão nas mossas que conduzem a deformação e provocam flexão local da fôrma (FERRER et al., 2007). A deformação adicionada ao efeito das identações do concreto, levam a separação dos materiais, Figura 2.6 (a). Durante o processo de deslizamento, as mossas presentes no flange inferior da fôrma de aço são comprimidas, fazendo com que a laje de concreto se separe da fôrma de aço e a mossa se deforme (YI et al., 2020). Em seguida, as identações do concreto ultrapassam a mossa e se encaixam no entalhe seguinte. Esse processo é mostrado na Figura 2.6 (b).

Figura 2.6 – Efeito da flexão nas lajes mistas, Ferrer et al (2007) e Yi et al (2020).



a) Mecanismo de resistência ao cisalhamento longitudinal.

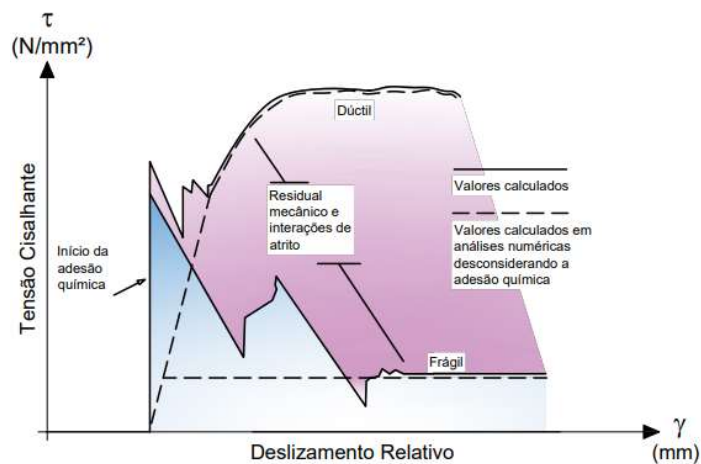


b) Mecanismo de resistência ao cisalhamento longitudinal.

Fonte: Adaptado de Ferrer et al (2007) e Yi et al (2020).

A combinação dos mecanismos de ligação define o comportamento da interface aço-concreto. Segundo Daniels e Crisinel (1993), a interface pode apresentar comportamento dúctil ou frágil dependendo dos mecanismos envolvidos, Figura 2.7. Nas lajes mistas frágeis, a parcela devido a resistência por atrito e a ligação mecânica são menores que a resistência promovida pela aderência química. Nas lajes mistas dúcteis, a recuperação após a perda da aderência química é maior, ou seja, a parcela da resistência promovida pelo atrito e pela ligação mecânica são maiores que a da aderência química. Após a recuperação, a laje mista continua suportando acréscimos de carga até que ocorra a degradação total da capacidade resistente da interface, resultando em falha do sistema.

Figura 2.7 - Mecanismos de transferência de forças cisalhantes na interface aço-concreto.

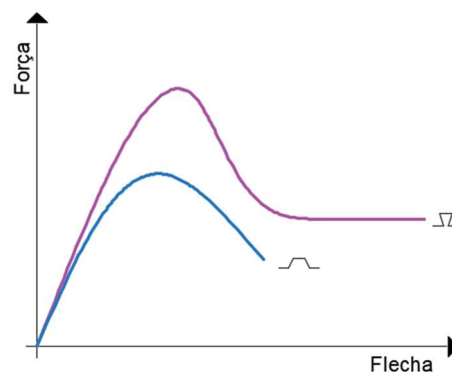


Fonte: Adaptado de Daniels e Crisinel (1993).

Outro fator da ligação mecânica está relacionada a geometria dos perfis que compõe a fôrma de aço. Estudos conduzidos por Ferrer et al (2007) e Burnet e Oehlers (2001) mostraram que a configuração geométrica da fôrma também podem contribuir para o aumento da capacidade última das lajes mistas. As formas com perfil reentrante, por exemplo, permitem que ocorra o efeito de confinamento do concreto no interior das nervuras, o que contribui para o aumento da capacidade última das lajes mistas. Contudo, para que o confinamento seja efetivo, deve-se garantir que as nervuras tenham um ângulo mínimo de retenção vertical (FERRER et al., 2007).

A retenção do concreto no interior das nervuras contribui tanto para o aumento da carga de pico quanto para o comportamento pós-pico das lajes mistas. Conforme as curvas força vs deslizamento das lajes trapezoidais e reentrantes ilustradas nas Figura 2.8, observa-se que as lajes com fôrma trapezoidal apresentam comportamento decrescente após a carga última (HOSSAIN et al., 2016; SOLTANALIPOUR et al., 2022; RIOS et al., 2017; BAI et al., 2020). Por outro lado, nas lajes com fôrma reentrante, observa-se que o trecho pós piso possui comportamento dúctil, marcado por uma resistência residual que resulta no trecho horizontal ilustrado na Figura 2.8 (LI et al., 2017; LI et al., 2019; SOLTANALIPOUR et al., 2022). O comportamento observado está relacionado ao efeito de confinamento do concreto que permite que a laje e a fôrma de aço permaneçam conectadas, mesmo após o início do deslizamento relativo. Nas lajes trapezoidais, observa-se a separação vertical entre os materiais após o início do deslizamento relativo (SOLTANALIPOUR et al., 2022).

Figura 2.8 – Comportamento da curva força x flecha para laje mista com fôrma trapezoidal e fôrma reentrante.



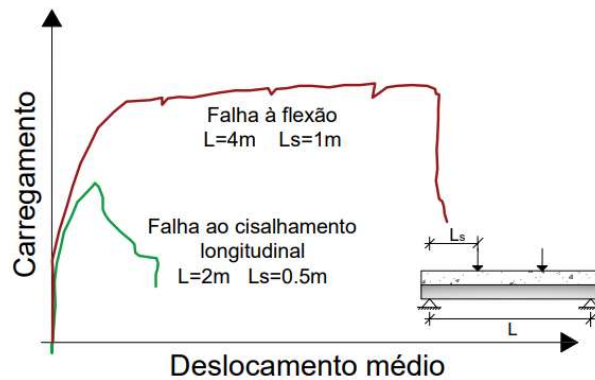
Fonte: O autor.

2.2.2.2. Falha por cisalhamento longitudinal

O comportamento da interface define o modo de falha apresentado pelas lajes mistas. Caso a resistência promovida pela interface seja suficiente para que o momento de

plastificação seja alcançado tem-se falha por flexão. Caso contrário, tem-se falha por cisalhamento longitudinal. Nesse caso, o momento resistente é inferior ao momento de plastificação da seção transversal mista evidenciado na falha por flexão, como ilustrado a Figura 2.9, proposta por Veljkovic (1996).

Figura 2.9 - Comparativo da falha à flexão e falha ao cisalhamento longitudinal.



Fonte: Adaptado de Veljkovic (1996).

A falha por cisalhamento longitudinal é resultado das forças de cisalhamento longitudinais desenvolvidas na interface aço-concreto quando a laje é submetida à flexão e ocorre quando as tensões cisalhantes na interface ultrapassam a resistência ao cisalhamento longitudinal promovido pelos mecanismos de ligação (FERRER et al., 2006; LI et al., 2017; SIMON et al., 2017; CIFUENTES; MEDINA, 2013; BAI et al., 2020). Ensaios de flexão conduzidos em protótipos de lajes mistas em escala real mostraram que a falha por cisalhamento longitudinal é evidenciada pelo considerável deslizamento longitudinal entre a fôrma de aço e a laje de concreto e pela formação de fissuras nas regiões próximas ao ponto de aplicação de carga. Após o início do deslizamento relativo, observa-se a redução significativa da rigidez e da resistência das lajes mistas (GHOLAMHOSEINI et al., 2014; MARIMUTHU et al., 2007; BURNET; OEHLERS, 2001).

Nas normas de dimensionamento, como ABNT NBR 8800:2008, EN 1994-1-1:2004 (EN-4) e ANSI/ASCE 3 (ANSI, 1991), são apresentados dois métodos para avaliação da resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas, são eles: método $m-k$ e o método da interação parcial (PSC). O método $m-k$ é válido para as lajes mistas dúcteis e frágeis, enquanto o método da interação parcial é válido apenas para as lajes mistas dúcteis. A classificação dúctil ou frágil é descrita no EN-4, em que o comportamento dúctil ocorre

quando a carga última exceder em, pelo menos, 10% da carga relativa ao deslizamento 0,1mm. Caso contrário, a laje mista será considerada do tipo frágil.

2.2.2.3. Modelos analíticos

Tanto o método $m-k$ quanto o método da interação parcial (*PSC*) necessitam de resultados experimentais para calibração de parâmetros correspondentes ao comportamento da interface aço-concreto.

Os resultados são obtidos a partir de ensaios de flexão conduzidos em protótipos com dimensões reais, para duas configurações de vão de cisalhamento, resultando em dois grupos com diferentes esbeltezes. No ensaio, aplica-se inicialmente um carregamento cíclico, seguido de carregamento estático. O carregamento cíclico tem como objeto promover o rompimento da adesão química da interface aço-concreto e, como observado em diversos estudos (AHMED; TSAVDARIDIS, 2019; CIFUENTES; MEDINA, 2013; SOLTANALIPOUR et al., 2019; MARIMUTHU et al., 2007), não influencia a capacidade de carga alcançada pelas lajes mistas.

a) Método $m-k$

O método $m-k$ (Eq. 1) consiste em determinar a força cortante última (V_u) atuante na laje mista. A equação foi originalmente proposta por Schuster (1970) e era restrita a lajes com comportamento frágil, que eram os únicos modelos de laje existentes na época. Atualmente, o método é definido por uma equação proposta por Schuster e Ling (1980) e pode ser utilizada tanto para lajes mistas com comportamento frágil quanto em comportamento dúctil. A Eq. 1 é obtida a partir do equilíbrio de forças na seção transversal no instante da falha. As variáveis existentes nessa equação consistem em V_u que é a força de cisalhamento final; b é a largura da laje mista; d_f é a profundidade efetiva da laje mista; A_f é a área nominal da seção transversal da fôrma de aço; L_s o comprimento do vão de cisalhamento. As constantes m e k são obtidas por regressão linear dos resultados experimentais, obtidos a partir de dois vãos de cisalhamento (curto e longo), e representam, fisicamente, o intertravamento mecânico e o atrito entre o concreto e a fôrma de aço.

$$\frac{V_u}{b.d_f} = \frac{m.A_f}{b.L_s} + k \quad (1)$$

b) Método da interação parcial

O método da interação parcial (Eq. (2) a Eq. (4)) tem como objetivo estimar o momento fletor resistente seção a seção. O método é válido apenas para lajes mistas com comportamento dúctil, uma vez que admite a plastificação de parte da fôrma de aço e de parte da laje de concreto.

No método da interação parcial, define-se o grau de conexão de cisalhamento entre a laje de concreto e a fôrma de aço (η), Eq. (2). Para isso pode-se comparar o momento fletor resistente (M_{Rd}), Eq. (3), ao momento fletor experimental (M_{sd}), Eq. (4):

$$\eta = \frac{N_c}{N_{cf}} \quad (2)$$

$$M_{Rd} = N_c \left(h - 0,5 \cdot x_{pl} - e_p + (e_p - e) \cdot \frac{N_c}{A_p \cdot f_{yd}} \right) + M_{pr} \quad (3)$$

$$M_{pr} = 1,25 \cdot M_{pa} \cdot \left(1 - \frac{N_c}{A_p \cdot f_{yd}} \right) \quad (4)$$

Nas equações (Eq. (2) a Eq. (4)) N_c é a resultante de compressão no concreto; N_{cf} a força normal na laje de concreto correspondente a falha à flexão, condição de conexão total; f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto; e_p é a distância da linha neutra plástica da fôrma de aço em relação a face inferior; e é a distância do centro geométrico da fôrma de aço a face inferior; N_{pa} é a força normal correspondente à plastificação da fôrma de aço; M_{pa} é o momento de plastificação na forma de aço.

A Eq. (4) resulta em uma equação de 2º grau, em que apenas uma das raízes estará dentro do intervalo $0 \leq x_{pl} \leq h_t$, sendo x_{pl} a distância da linha neutra plástica no bloco de concreto à face superior de uma laje mista e h_t altura total da laje mista. A partir das raízes, o valor de N_c a ser escolhido será aquele que satisfizer a relação $0 \leq N_c \leq N_{cf}$.

A partir dessas equações, a tensão média resistente ao cisalhamento longitudinal pode ser obtida através da Eq. (5):

$$\tau_u = \frac{\eta \cdot N_{cf}}{b \cdot (L_s + L_o)} \quad (5)$$

Em que L_o é o comprimento em balanço após o apoio; b é a largura da laje mista; L_s corresponde ao vão de cisalhamento.

2.2.3. Modelagem numérica

Para o desenvolvimento de modelos analíticos deve-se dispor de resultados experimentais com adequada representatividade. Como os ensaios experimentais envolve o consumo considerável de tempo em laboratório e de recursos financeiros para a produção de protótipos e ensaios dos protótipos, muitos autores propuseram que o estudo da influência de variáveis nos comportamentos local e global das lajes mistas fosse feito a partir modelagem numérica. A modelagem numérica ajuda a reduzir a quantidade de ensaios experimentais, pois, a partir do resultado de poucos protótipos pode-se calibrar e validar o modelo numérico.

Ao longo dos anos, diferentes abordagens foram utilizadas para simular o comportamento das lajes mistas de aço e concreto (SHIRGAONKAR et al., 2021; BAI et al., 2020; HOSSAIN et al., 2019; MOHAMMED et al., 2016; GHOLAMHOSEINI et al., 2014; Rana et al., 2015). Nos modelos observa-se simplificações quanto a discretização do comportamento da interface aço-concreto e do comportamento não-linear dos materiais.

Os principais parâmetros para a definição de um modelo numérico são: geometria da laje, modelo constitutivo dos materiais, malha e condições de contorno (apoios, carregamento e simetria). Na Tabela 2.1 são resumidas algumas das estratégias utilizadas no desenvolvimento de modelos numéricos de lajes mistas de aço e concreto propostas na literatura e que serão importantes para este trabalho.

Tabela 2.1 – Resumo das principais características adotadas para os modelos numéricos de lajes mistas.

Artigo	Componente	Malha	Modelo Constitutivo	Interface
Soltanalipour et al (2022)	Concreto ECC	SOLID187	Modelo de Menetrey-William	-Definição da interface de concreto como elemento TARGE170 e para interface de aço elemento CONTA174;
	Fôrma de aço	SHELL281	Elasto plástico perfeito	-Coeficiente de atrito de 0.2 a 0.9, a depender do comprimento do vão e do material da fôrma.
Bai et al (2020)	Concreto ECC	C3D8R	Modelo de Meng et al	-Aço-concreto: elementos de mola tipo Radial-thrust;
	Fôrma de aço	S4R	Elasto-plástico	
	Conector de cisalhamento	C3D8R	Elasto-plástico	-Conector - Fôrma: Atrito + Hard Contact.
	Barras de aço	T3D2	Elasto-plástico	
Hossain et al (2019)	Concreto	C3D8R	CDP	-Aço-Concreto: Atrito;
	Fôrma de Aço	S4R	Modelo de tensão-deformação de Cauchy	-Barras de aço-concreto: Embedded.
	Barras de aço	S4R	Modelo de tensão-deformação de Cauchy	
Soltanalipour et al (2019)	Concreto	SOLID187	Smeared Cracking	- Modelagem das mossas + atrito.
	Concreto	SOLID65	Smeared Cracking	
	Fôrma de aço	SHELL281	Elasto - plástico perfeito	
Rios et al (2017)	Concreto	C3D8R	CDP	-Elemento de mola do tipo Radial-Thrust.
	Fôrma de aço	S4R	Elasto-plástico perfeito com Critério de Von Mises	
Rana et al (2015)	Concreto	C3D8R	CDP	-Elemento de mola do tipo Radial-Thrust.
	Fôrma de Aço	S4R	Elasto -plástico com encruamento	
Gholamhoseini et al (2014)	Concreto	CC3D	Nonlinear Cementitious 2	- Conexão total entre fôrma e concreto;
	Fôrma de aço	CC3D	Elasto-plástico perfeito	- Conexão parcial permitindo que ocorra o deslizamento entre o deck de aço e o concreto.
	Placa de aço	CC3D	Elástico linear (Elastic Isotropic)	
Abdullah e Easterling (2009)	Concreto	C3D8R	Concrete Smeared Cracking	-Elemento de mola do tipo Radial-Thrust.
	Fôrma de aço	S4R	Elástico linear	

Entre os modelos propostos na literatura, destacam-se os trabalhos de Bai et al (2020), Hossain et al (2019) e Rios et al (2017), pois possuem maior correlação com o que será desenvolvido nesse trabalho.

Rios et al (2017) buscaram avaliar a influência da esbeltez da laje mista para diferentes configurações de carregamento. Para tal, foi desenvolvido um modelo numérico no software Abaqus, em que a laje foi discretizada com elemento sólido (C3D8R) e fôrma de aço

como elemento de casa (S4R). Os autores caracterizam o concreto com o modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) e elasto-plástico perfeito para o aço. Para descrever o comportamento da interface aço-concreto, utilizou-se a curva tensão cisalhante vs deslizamento através do modelo do tipo *Radial-Thrust* (CONN3D2), proposto por Abdullah e Easterling (2004). Os autores destacam que a modelagem da interface aço-concreto controla o comportamento misto das lajes, por isso é importante defini-la adequadamente. Nesse sentido, os elementos de conectores utilizados por Abdullah e Easterling (2004) para simular o comportamento da interface contribuíram para que a resposta do modelo numérico fosse confiável.

Os autores Bai et al (2020) conduziram ensaios experimentais e numéricos de lajes mistas biapoiadas com concreto convencional e o concreto *Engineered Cementitious Composite* (ECC) com e sem conectores de cisalhamento. O objetivo foi avaliar a influência do concreto, do conector de cisalhamento e da espessura da fôrma na resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas. Assim como Rios et al (2017), no modelo proposto por Bai et al (2020), a interface aço-concreto foi simulada com elementos de mola do tipo *Radial-Thrust* (CONN3D2). Os autores concluíram que o modelo numérico apresentou bons resultados em termos de comportamento global e local quando comparados aos resultados experimentais, além disso, o modelo numérico foi capaz de perceber a influência do concreto ECC no comportamento ao cisalhamento longitudinal nas lajes com conectores de cisalhamento. A descrição do modelo computacional está representada na Tabela 2.1.

Os autores Hossain et al (2019) testaram diferentes algoritmos para discretização do comportamento da interface aço-concreto, são eles: *kinematic finite sliding*, *kinematic small sliding* e *penalty contact*. O algoritmo *penalty contact* foi o que forneceu melhores resultados em termos globais e conduziu a melhor precisão do deslizamento relativo entre os materiais. Os autores desenvolveram modelos numéricos de lajes mistas admitindo diferentes tipos de concretos como o concreto convencional, concreto autoadensável (SCC) e o concreto ECC. Os autores observaram que os modelos numéricos propostos apresentaram bons resultados quando comparado aos protótipos experimentais, permitindo simular de modo confiável o comportamento estrutural de lajes mistas com diferentes tipos de concreto. Mais detalhes sobre o modelo proposto por Hossain et al (2019) estão resumidos na Tabela 2.1.

2.3. Desenvolvimento do modelo numérico

Para a realização do estudo paramétrico foram desenvolvidos modelos numéricos de lajes mistas com fôrmas trapezoidais e reentrantes. A modelagem numérica foi realizada no software Abaqus. O programa utilizado permite definir o comportamento não linear dos materiais e da interface, além de possuir um conjunto de ferramentas que permite simular as condições de contorno. Tais características permitiram o desenvolvimento de modelos numéricos tridimensionais capazes de simular o comportamento misto das lajes mistas de aço e concreto, possibilitando a reprodução do comportamento verificado em ensaios experimentais.

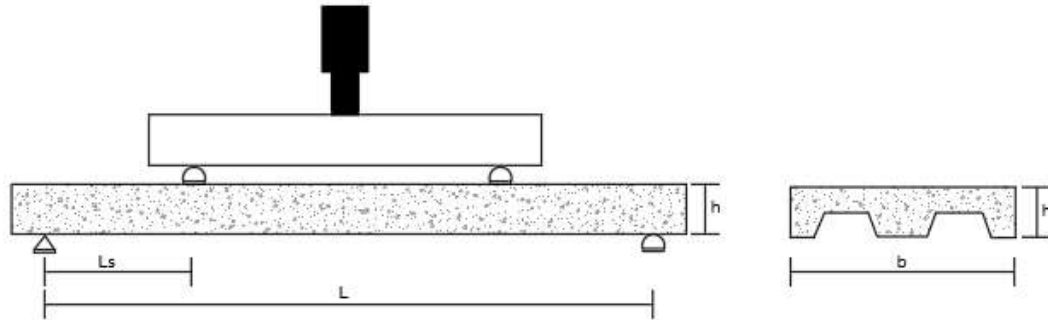
Para a validação da estratégia de modelagem utilizada, foram modelados quatro protótipos experimentais, dois protótipos ensaiados por Bai et al (2020) e dois por Li et al (2017), ambos com diferentes esbeltezes. Os protótipos de Bai et al (2020) possuem uma fôrma de aço trapezoidal, uma laje com o concreto *Engineered Cementitious Composite* (ECC) e malha de aço eletro-soldada, posicionada no topo da laje de concreto. Os protótipos de Li et al (2017) possuem uma fôrma de aço reentrante e laje de concreto com agregado leve (*Lightweight Aggregate Concrete* - LWAC).

As características geométricas e mecânicas desses modelos estão apresentadas na Tabela 2.2 e os parâmetros geométricos apresentados na Figura 2.10. As variáveis destacadas na tabela são: comprimento da laje mista (L); altura da laje mista (h); espessura da fôrma de aço (t); largura da laje mista (b); comprimento do vão de cisalhamento (L_s); resistência à compressão do concreto (f_c); módulo de elasticidade do concreto (E_c); resistência ao escoamento da fôrma de aço (f_y); módulo de elasticidade do aço (E_s). A identificação das lajes (ID) foi estabelecida de modo que B, representa os modelos de Bai et al (2020), e L, representa os modelos Li et al (2017), e o tipo de fôrma T, para trapezoidal, e, R para reentrante, seguido da altura da laje, vão de cisalhamento e espessura da fôrma.

Tabela 2.2 – Propriedades geométricas e mecânicas das lajes mistas utilizadas para calibração do modelo numérico

Autor	ID	L (mm)	h (mm)	t (mm)	b (mm)	Ls (mm)	fc (MPa)	Ec (GPa)	fy (GPa)	Es (GPa)
Bai et al (2020)	BT-150/450/0.8	1800	150	0.8	688	450	36.56	18.1	308.74	227
	BT-150/800/0.8	3200	150	0.8	688	800	36.56	18.1	308.74	227
Li et al (2017)	LR-147/500/1.2	2200	147	1.2	720	500	34.96	26.3	232	180
	LR-148/900/1.2	3800	148	1.2	720	900	34.96	26.3	232	180

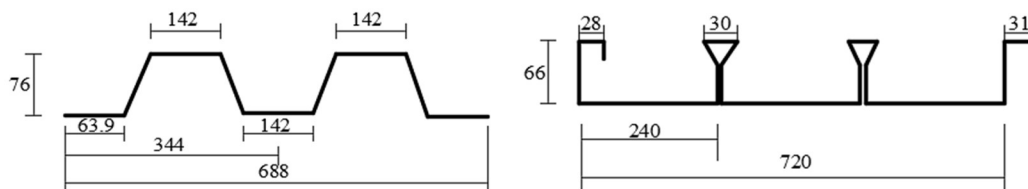
Figura 2.10 – Parâmetros geométricos das lajes mistas.



Fonte: O autor.

A configuração geométrica da fôrma trapezoidal e da fôrma reentrante utilizadas por Bai et al (2020) e Li et al (2017) é ilustrada na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Configuração geométrica da fôrma de aço.



a) Fôrma trapezoidal.

b) Fôrma reentrante.

Fonte: Adaptado de (a) Bai et al (2020) e (b) Li et al (2017).

2.3.1. Modelo constitutivo dos materiais

Nos modelos numéricos, o comportamento do concreto foi simulado a partir do modelo *Concrete Damage Plasticity (CDP)*. O CDP foi escolhido devido a sua capacidade de representar o comportamento não-linear do concreto e as falhas por esmagamento e por fissuração do concreto (HOSSAIN et al., 2019; MANSOUR et al., 2022). No CDP também é possível indicar a degradação da rigidez do concreto a partir de curvas de dano.

No *CDP* é necessário que o usuário defina o comportamento à tração e à compressão do material através de curvas tensão *vs* deformação. O comportamento à compressão admitido para os modelos foi simulado a partir de dois trechos, Figura 2.12 (a). O primeiro trecho corresponde a fase elástica, considerada até 30% da tensão máxima. No segundo trecho, o concreto possui comportamento inelástico e foi baseado no modelo proposto por Guo (2014).

O modelo proposto por Guo (2014) é descrito pelas equações que descrevem a relação de tensão-deformação à compressão para o trecho inelástico de acordo com a relação entre a deformação e a deformação de pico (x). O modelo é descrito pelas Eqs. (6), (7) e (8), onde f_{bm} = tensão de pico à compressão do concreto; E_{cm} = módulo de elasticidade inicial (para uma tensão igual a $0,3f_{bm}$); E_{c1} = módulo de elasticidade para a tensão máxima. O parâmetro α_a está relacionado ao ramo ascendente da curva, enquanto o α_d modifica o ramo descendente da curva tensão *vs* deformação e varia de 0 a 4. Ele deve ser calibrado com base no comportamento pós pico do material.

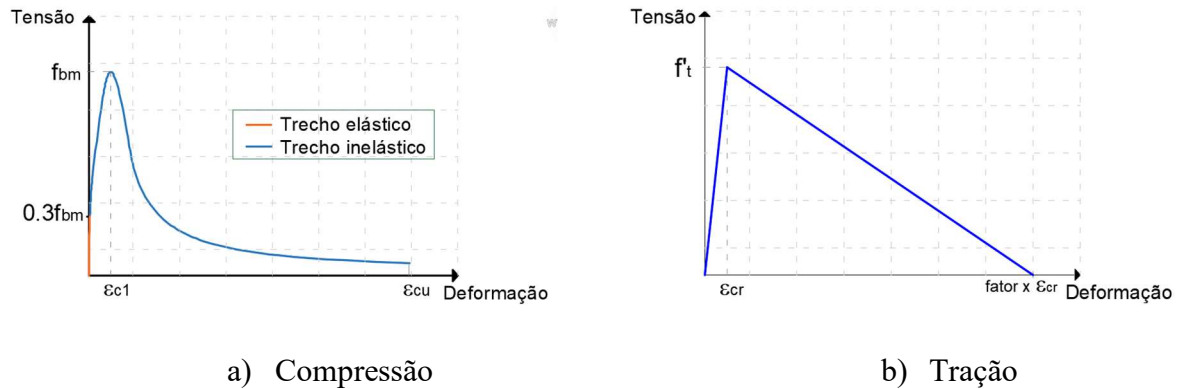
$$\sigma_c = f_{bm}[\alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3] \quad x \leq 1 \quad (6)$$

$$\sigma_c = \frac{f_{bm}x}{\alpha_d(x - 1)^2 + x} \quad x > 1 \quad (7)$$

$$\alpha_a = \frac{E_{cm}}{E_{c1}} \quad (8)$$

O comportamento do concreto à tração, foi descrito pelo modelo linear, proposto por Bathe et al (1989), Figura 2.12 (b), no qual admite-se comportamento linear após a resistência à tração do concreto ter sido alcançada. De acordo com Hossain et al (2019) a deformação de pico ($\epsilon_{cr} = f_t/E_c$) é da ordem de 10^{-4} e a deformação última que resulta em tensão igual a zero corresponde a uma amplificação da deformação de pico. Estudos paramétricos conduzidos, mostraram que para o concreto ECC e LWAC os fatores de amplificação devem ser 70 e 100, respectivamente.

Figura 2.12 – Curva do concreto à compressão e à tração.



Fonte: O autor.

Além da curva tensão *vs* deformação deve-se definir a superfície de falha do modelo *CDP*. Para tal, deve-se definir parâmetros relacionados ao ângulo de dilatância (ψ), a excentricidade, a razão entre as tensões de compressão biaxiais e uniaxiais (f_{bo}/f_{co}), a razão entre o segundo invariante de tensão no meridiano de tração e de compressão (K) e o parâmetro de viscosidade (μ). Os valores adotados para os modelos numéricos foram calibrados com base em diferentes recomendações presentes na literatura e estão resumidos na Tabela 2.3 (HOSSAIN et al., 2019; KHAN et al., 2020; MENG et al., 2017; LIU et al., 2020; LIU et al., 2022; WANG et al., 2022; KOH et al., 2009; WU et al., 2021).

Tabela 2.3 – Propriedades do CDP

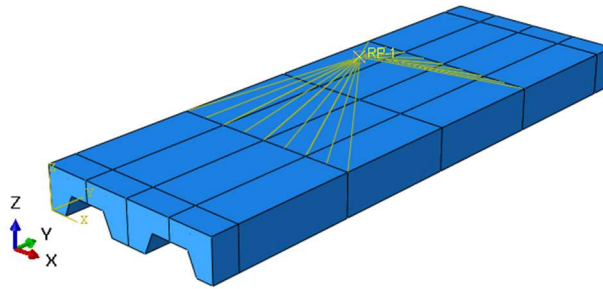
Lajes	ψ	Excentricidade	f_{bo}/f_{co}	K	μ
Bai et al (2020)	35	1.16	1.16	0.667	1.00E-06
Li et al (2017)	25	0.1	1.16	0.667	1.00E-06

O comportamento do aço das fôrmas e das barras da malha eletro-soldada foi admitido como elástico linear perfeito com módulo de elasticidade e resistência ao escoamento indicados na Tabela 2.2 e coeficiente de Poisson de 0,3.

2.3.2. Condições de contorno

A mesma estratégia utilizada na definição das condições de contorno foi adotada para os quatro protótipos, em nenhum deles foi utilizado condições de simetria. O carregamento foi aplicado às lajes como deslocamento prescrito a partir de um ponto de referência (*RP*). Esse ponto foi definido na região central da laje mista, a uma altura de 100mm da face superior da laje de concreto. O *RP* foi acoplado à duas linhas distribuídas no topo da laje de concreto (linhas amarelas da Figura 2.13) por meio de links do tipo *Coupling* e *Kinematic*.

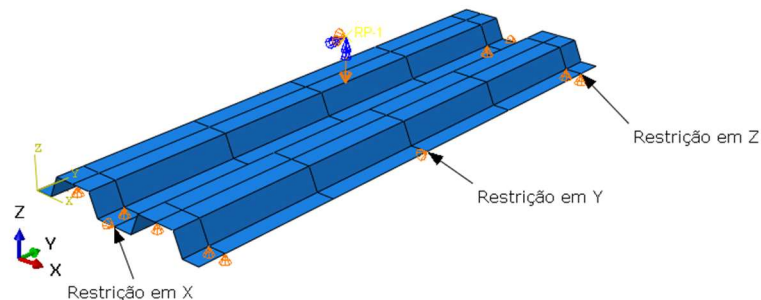
Figura 2.13 – Condições de contorno do ponto de aplicação de carga.



Fonte: O autor.

No ponto de aplicação de carga foi permitido apenas o deslocamento em Z e a rotação em X. Além disso, foi restringido o deslocamento do modelo em Z, na região dos apoios e em X e Y na região central. As restrições no ponto de aplicação de carga e na fôrma estão ilustradas na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Restrições da fôrma e do ponto de aplicação de carregamento.



Fonte: O autor.

2.3.3. Interações de contato

Para que o modelo numérico seja representativo é necessário que o comportamento da interface aço-concreto seja adequadamente representado (SOLTANALIPOUR et al., 2022; BAI et al., 2020; AHMED; TSVDARIDIS, 2019; GHOLAMHOSEINI et al., 2014; LI et al., 2017; CIFUENTES; MEDINA, 2013; SIMON et al., 2017). Alguns autores representaram o comportamento da interface aço-concreto a partir de elementos de mola (BAI et al., 2020; RIOS et al., 2017; RANA et al., 2015; ABDULLAH; EASTERLING, 2004), outros como propriedades de contato do tipo friction e da combinação entre elas (HOSSAIN et al., 2019; PEREIRA; SIMÕES, 2019; SOLTANALIPOUR et al., 2019).

Nos modelos, a interface foi representada a partir de uma superfície coesiva, já reproduzido em outros trabalhos (MOSLEMI et al., 2020; MOSLEMI et al., 2021; MOLINA

et al., 2015; HENRIQUES et al., 2013). O comportamento coesivo é descrito pela Lei Tração-Separação, no qual é previsto um trecho crescente com comportamento elástico linear, seguido de um trecho decrescente que pode ou não ter comportamento linear e é utilizado para descrever o início e a evolução do dano na interface. Nos modelos, o início do dano foi discretizado a partir do critério de inicialização do tipo *maximum nominal stress* e evolução do dano foi descrita a partir do comando *maximum separation*. Os parâmetros utilizados nos protótipos trapezoidais e reentrantes estão apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 4 – Propriedades da superfície coesiva.

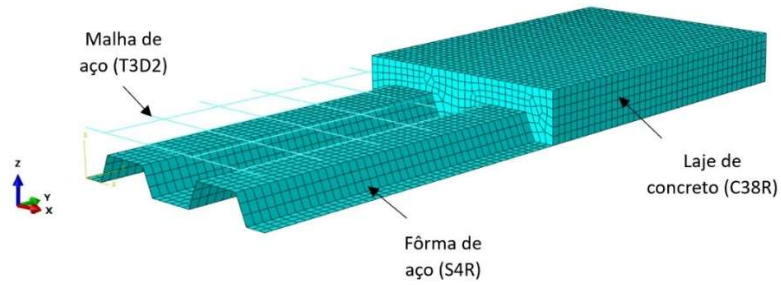
Lajes	knn	kss	ktt
Bai et al (2020)	2	0.02	0.02
Li et al (2017)	10	0.8	0.8

Para o contato normal entre a fôrma de aço e o concreto foi utilizado a propriedade de contato do tipo *Hard Contact*. Esse modelo permite que não haja nenhuma penetração entre os elementos. As lajes do Bai et al (2019) preveem o uso de armadura de aço na laje de concreto e para esse contato utilizou-se a propriedade de contato do tipo *Embedded*. A interação do tipo *Embedded* promove aderência perfeita entre a laje de concreto e as barras da armadura (LUNA et al., 2015).

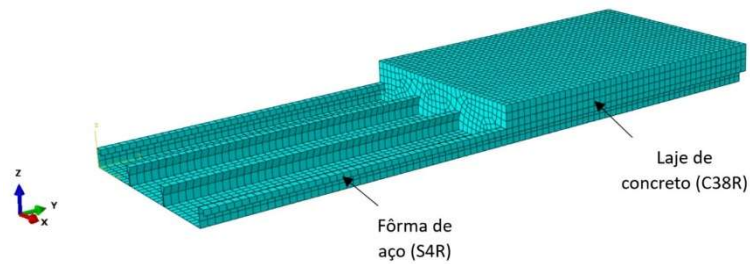
2.3.4. Malha em elementos finitos

A laje de concreto foi discretizada com elementos sólidos hexaédricos linear de oito nós com integração reduzida (C3D8R). A fôrma de aço foi discretizada com elementos de casca de quatro nós com integração reduzida (S4R). As barras de aço que compõe a malha de aço nas lajes trapezoidais foram modeladas utilizando elemento de treliça de dois nós (T3D2). A Figura 2.15 mostra a malha dos modelos numéricos.

Figura 2.15 – Elementos do modelo numérico.



a) Laje mista com fôrma trapezoidal.

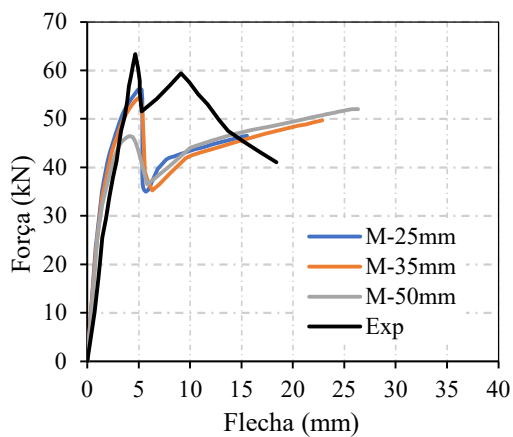


b) Laje mista com fôrma reentrante.

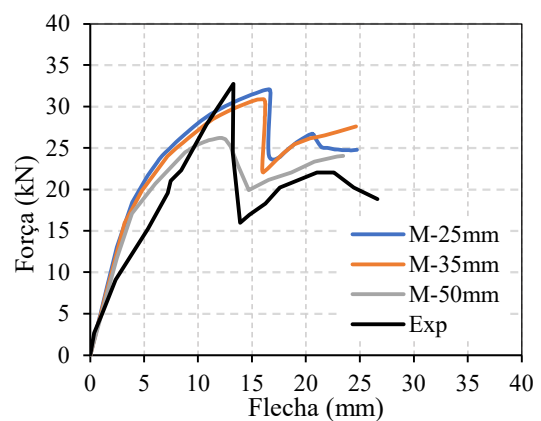
Fonte: O autor.

Os modelos numéricos foram validados com base nas curvas força vs flecha experimentais dos protótipos modelados e o resultado está indicado na Figura 2.16. Nessa figura são comparadas as curvas numéricas e experimentais para diferentes tamanhos de malha.

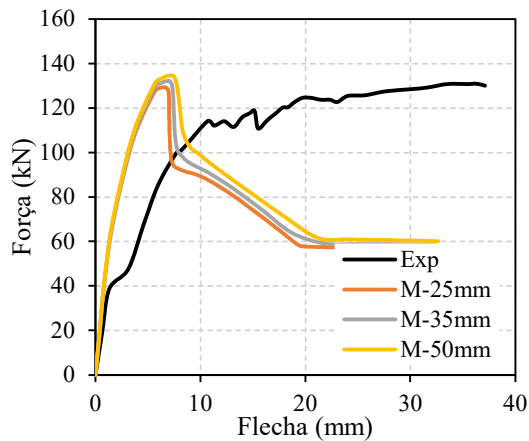
Figura 2.16 – Curva força-flecha numérica e experimentais para diferentes tamanhos de malha.



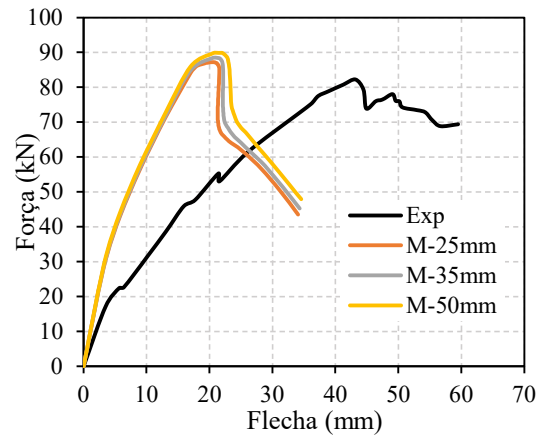
a) Protótipo BT-150/450/0.8



b) Protótipo BT-150/800/0.8



c) Protótipo LR-147/500/1.2



d) Protótipo LR-148/900/1.2

Fonte: O autor.

Na Tabela 2.5 é apresentado a relação entre o tamanho dos elementos finitos e o tempo de processamento das lajes.

Tabela 2.5 – Análise computacional dos elementos de malha para laje trapezoidal, baseada em Bai et al (2020).

ID	Malha (mm)	Quantidade de elementos			Total de nós	F _{EXP} (kN)	F _{FEM} (kN)	Erro (%)	Tempo de Processamento*	
		Concreto	Fôrma	Malha de aço						
BT-150/450/0.8	25	11920	2880	640	15440	18833	61.8	56.24	9	20min2s
	35	3944	1392	456	5792	7504	61.8	54.22	12.27	3min25s
	50	1560	640	340	2540	3424	61.8	52.01	15.84	1min52s
BT-150/800/0.8	25	20264	4896	1041	26201	31813	32.93	32.1	2.52	22min33s
	35	6664	2352	737	9753	12564	32.93	30.9	6.16	6min19s
	50	2652	1088	547	4287	5738	32.93	26.23	20.35	1min13s
LR-147/500/1.2	25	17248	4312	-	21560	25899	130.98	129.39	1.21	13min37s
	35	7688	2418	-	10106	12537	130.98	132.2	0.93	2min30s
	50	3476	1364	-	4840	6255	130.98	134.72	2.86	1min0s
LR-148/900/1.2	25	30552	7448	-	38000	45288	82.22	87.2	6.06	17min8s
	35	13860	4290	-	18150	22311	82.22	88.41	7.53	4min14s
	50	5928	2356	-	8284	10626	82.22	89.89	9.33	1min38s

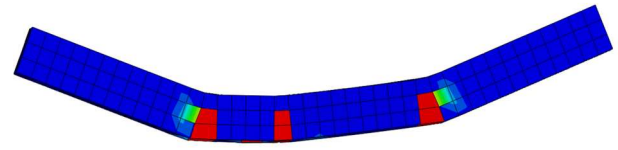
* Considerando a mesma configuração computacional (para efeito de comparação).

Nas Figuras 2.17 e 2.18 são comparados a configuração da laje numérica e experimental no instante da falha por cisalhamento longitudinal para as malhas de 25, 35 e 50mm. Li et al (2017) não apresenta imagens das lajes mistas no instante da falha, contudo, os autores descrevem que a falha ocorre por cisalhamento longitudinal. Esse modo de falha é evidenciado pelo deslizamento relativo entre a fôrma de aço e a laje de concreto e fissuras na região de aplicação de carga.

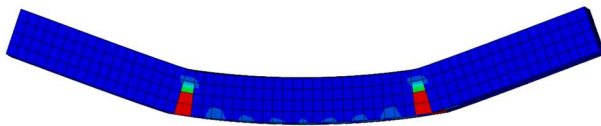
Figura 2.17 – Dano no concreto para diferentes tamanhos de malha – Laje BT-150/450/0.8.



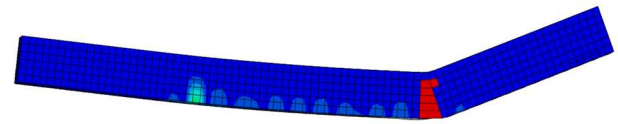
a) Experimental



b) Dano no concreto - Malha de 50mm



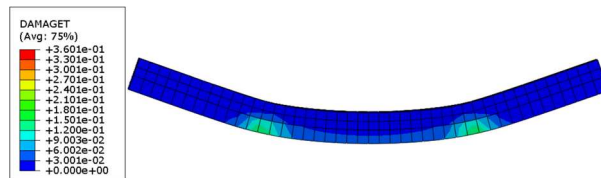
c) Dano no concreto - Malha de 35mm.



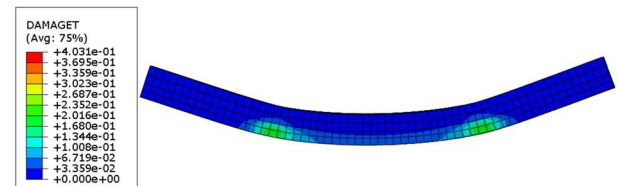
d) Dano no concreto - Malha de 25mm.

Fonte: (a) Bai et al (2020); (b), (c) e (d) O autor.

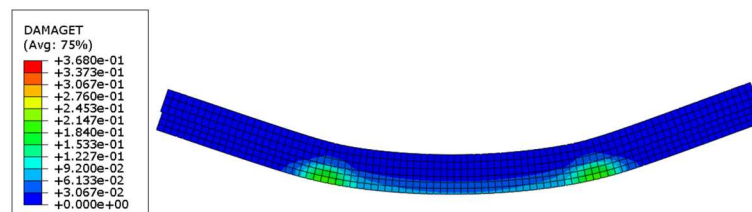
Figura 2.18 – Dano no concreto para diferentes tamanhos de malha – Laje LR-147/500/01.2.



a) Dano no concreto - Malha de 50mm



b) Dano no concreto - Malha de 35mm.



c) Dano no concreto - Malha de 25mm.

Fonte: (a), (b) e (c) O autor.

A malha de 25mm resultou em melhor custo-benefício, pois combina a visualização das regiões fissuradas, maior precisão quando comparado aos resultados experimentais e boa

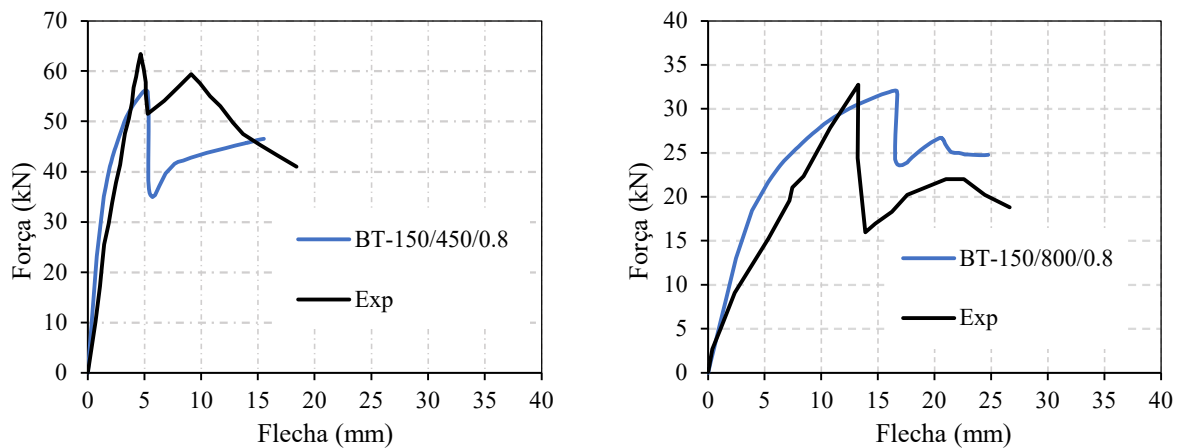
eficiência computacional. Além disso, o uso de elementos em integração reduzida, ao invés de completa, não prejudicou os resultados, quando comparado aos resultados experimentais, e contribuíram para os bons resultados em termos de tempo de processamento.

Assim, para os modelos numéricos admitiu-se elementos com comprimento de 25mm. A escolha do tamanho da malha está de acordo ao já observado em trabalhos de lajes mistas realizados por outros autores presentes na literatura (HOSSAIN Eet al., 2019; BAI et al., 2020; KATWAL et al., 2021). Após o modelo calibrado, uma análise numérica foi conduzida a fim de identificar os parâmetros que mais influenciam no comportamento das lajes mistas.

2.3.5. Validação do modelo numérico

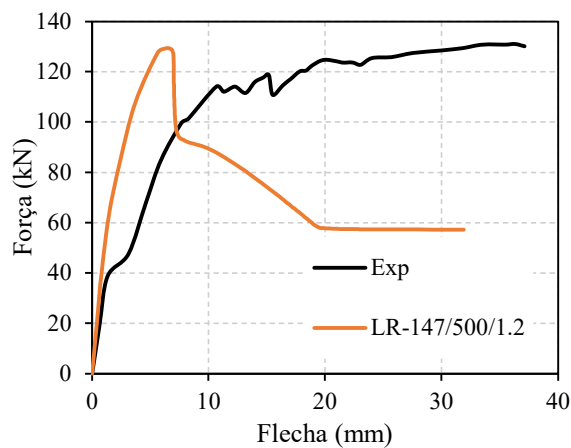
Na Figura 2.19 são comparadas as curvas força vs flecha experimentais e numéricas. Nota-se boa concordância entre elas. A comparação entre as cargas últimas numéricas e experimentais estão comparadas na Tabela 2.6.

Figura 2.21 – Comparação da curva força-flecha do modelo numérico com o modelo experimental.

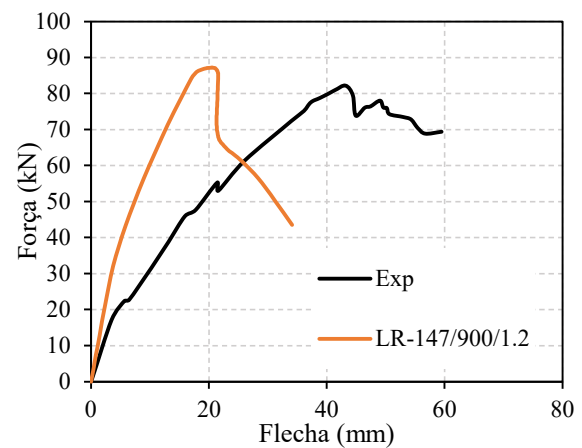


a) Espécime BT-150/450/0.8

b) Espécime BT-150/800/0.8



c) Espécime LR-147/500/1.2



d) Espécime LR-148/900/1.2

Fonte: O autor.

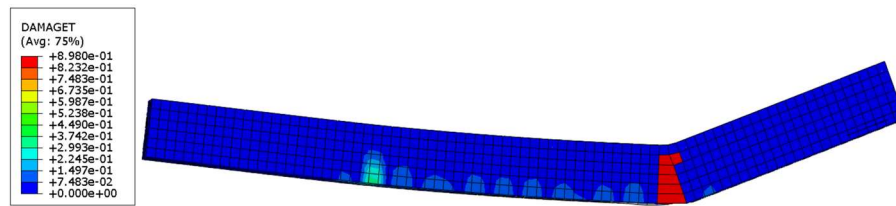
Tabela 2.7 – Valores numéricos e experimentais do modelo numérico definitivo.

ID	Experimental	Numérico	Erro (%)
BT-150/450/0.8	61.8	56.24	9.00
BT-150/800/0.8	32.93	32.10	2.52
LR-147/500/1.2	130.98	129.39	1.21
LR-148/900/1.2	82.22	87.20	6.06

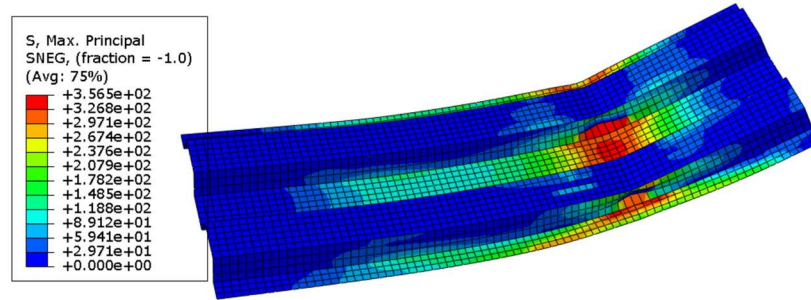
Observa-se que a capacidade última obtida numericamente se apresenta muito próxima da experimental. Para as lajes de Bai et al (2020) observa-se boa concordância tanto em relação à carga última alcançada pelo sistema, quanto em relação à rigidez do trecho inicial. Nas lajes de Li et al (2017), a rigidez inicial prevista pelos modelos numéricos foi superior dos protótipos experimentais, o que pode estar atrelada a superestimativa do confinamento do concreto na região das nervuras.

Além da carga última, os modelos numéricos também foram capazes de reproduzir o modo de falha observado nos ensaios experimentais. Como observado na Figura 2.19 (a) é possível observar que as fissuras na laje de concreto abaixo dos pontos de aplicação de carga é similar ao que ocorreu nos protótipos com falha por cisalhamento longitudinal. Na Figura 2.19 (b) é ilustrado a distribuição de tensões principais na fôrma de aço na carga de pico. Assim como nos protótipos experimentais, observa-se o escoamento da fôrma na região dos pontos de aplicação de carga.

Figura 2.19 – Fissuração no protótipo BT-150/400/0.8.



a) Dano no concreto.

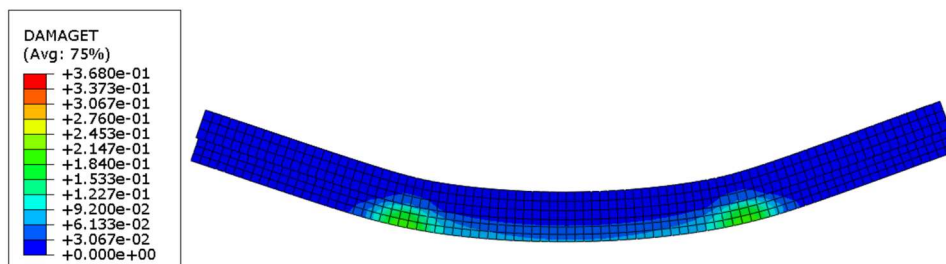


b) Tensões principais na fôrma de aço.

Fonte: O autor.

Assim como nos modelos de Bai et al (2020), os modelos numéricos das lajes reentrantes também apresentaram falha por cisalhamento longitudinal, o que está em concordância com o comportamento descrito por Li et al. (2017). Na Figura 2.20 é ilustrado a distribuição das fissuras na carga última alcançada pelos protótipos. Observa-se a fissuração do concreto seguida do deslizamento relativo entre os materiais.

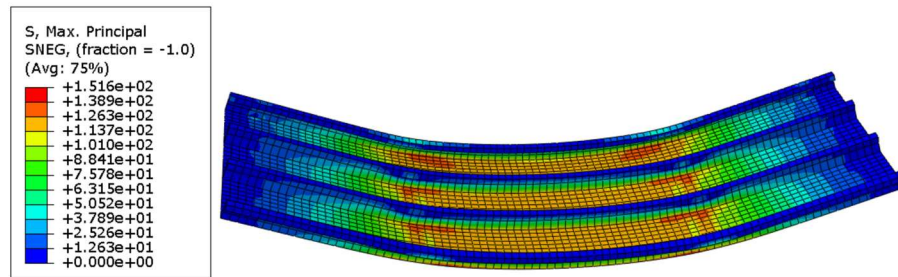
Figura 2.20 – Tensão cisalhante na direção longitudinal no protótipo LR-147/500/1.2.



Fonte: O autor.

Como uma característica da falha por cisalhamento longitudinal, a falha ocorre sem que haja a perda da integridade dos materiais, logo, como esperado, o concreto é pouco solicitado a compressão e a fôrma de aço não é plastificada. A Figura 2.21 mostra a distribuição de tensões principais na fôrma de aço. Observa-se que a máxima tensão alcançada está concentrada na região do ponto de aplicação de carga, como esperado.

Figura 2.21 – Tensões principais no protótipo LR-147/500/1.2.



Fonte: O autor.

2.4. Estudo paramétrico

O estudo paramétrico teve como objetivo investigar a influência de diferentes variáveis na capacidade última das lajes mistas sem conector de cisalhamento. As variáveis investigadas no estudo paramétrico foram: comprimento do vão de cisalhamento (L_s), espessura da fôrma de aço (t), altura da laje de concreto (h), resistência à compressão do concreto (f_c) e resistência ao escoamento da fôrma de aço (f_y). Nas Tabelas 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10 são apresentados os intervalos de variação dos parâmetros investigados.

Os protótipos trapezoidais foram nomeados da forma T-UU/VV/WW/XX/YY/ZZ. No local da letra U é indicado o comprimento da laje; a letra V indica a altura da laje de concreto; W refere-se a espessura da fôrma de aço; X é o comprimento do vão de cisalhamento; Y é a resistência a compressão da laje de concreto e Z é a resistência ao escoamento da fôrma de aço. Os protótipos de fôrmas reentrantes seguem a mesma lógica apresentada, sendo iniciados pela letra R. Nas tabelas, destaca-se em azul os parâmetros que estão sendo modificados em cada avaliação.

Tabela 2.7 – Análise paramétrica das lajes trapezoidais de menor comprimento (T-1800).

Parâmetro	Espécime	L (mm)	h (mm)	t (mm)	b (mm)	Ls (mm)	fc (MPa)	fy (GPa)
Vão de cisalhamento (Ls)	T-1800/150/0.8/300/36.6/309	1800	150	0.8	688	300	36.6	309
	T-1800/150/0.8/600/36.6/309	1800	150	0.8	688	600	36.6	309
Espessura da fôrma de aço (t)	T-1800/150/1/450/36.6/309	1800	150	1	688	450	36.6	309
	T-1800/150/1.2/450/36.6/309	1800	150	1.2	688	450	36.6	309
	T-1800/150/1.5/450/36.6/309	1800	150	1.5	688	450	36.6	309
Altura da Laje de Concreto (h)	T-1800/100/0.8/450/36.6/309	1800	100	0.8	688	450	36.6	309
	T-1800/200/0.8/450/36.6/309	1800	200	0.8	688	450	36.6	309
	T-1800/250/0.8/450/36.6/309	1800	250	0.8	688	450	36.6	309
Resistência a compressão do concreto (fc)	T-1800/150/0.8/450/25/309	1800	150	0.8	688	450	25	309
	T-1800/150/0.8/450/30/309	1800	150	0.8	688	450	30	309
	T-1800/150/0.8/450/40/309	1800	150	0.8	688	450	40	309
Resistência a compressão da fôrma de aço (fy)	T-1800/150/0.8/450/36.6/250	1800	150	0.8	688	450	36.6	250
	T-1800/150/0.8/450/36.6/350	1800	150	0.8	688	450	36.6	350

Tabela 2.8 – Análise paramétrica das lajes trapezoidais de maior comprimento (T-3200).

Parâmetro	Espécime	L (mm)	h (mm)	t (mm)	b (mm)	Ls (mm)	fc (MPa)	fy (GPa)
Vão de cisalhamento (Ls)	T-3200/150/0.8/300/36.6/309	3200	150	0.8	688	300	36.6	309
	T-3200/150/0.8/600/36.6/309	3200	150	0.8	688	600	36.6	309
	T-3200/150/0.8/900/36.6/309	3200	150	0.8	688	900	36.6	309
Espessura da fôrma de aço (t)	T-3200/150/1/800/36.6/309	3200	150	1	688	800	36.6	309
	T-3200/150/1.2/800/36.6/309	3200	150	1.2	688	800	36.6	309
	T-3200/150/1.5/800/36.6/309	3200	150	1.5	688	800	36.6	309
Altura da Laje de Concreto (h)	T-3200/100/0.8/800/36.6/309	3200	100	0.8	688	800	36.6	309
	T-3200/200/0.8/800/36.6/309	3200	200	0.8	688	800	36.6	309
	T-3200/250/0.8/800/36.6/309	3200	250	0.8	688	800	36.6	309
Resistência a compressão do concreto (fc)	T-3200/150/0.8/800/25/309	3200	150	0.8	688	800	25	309
	T-3200/150/0.8/800/30/309	3200	150	0.8	688	800	30	309
	T-3200/150/0.8/800/40/309	3200	150	0.8	688	800	40	309
Resistência a compressão da fôrma de aço (fy)	T-3200/150/0.8/800/36.6/250	3200	150	0.8	688	800	36.6	250
	T-3200/150/0.8/800/36.6/350	3200	150	0.8	688	800	36.6	350

Tabela 2.9 – Análise paramétrica das lajes reentrantes de menor comprimento (R-2200).

Parâmetro	Espécime	L (mm)	h (mm)	t (mm)	b (mm)	Ls (mm)	fc (MPa)	fy (GPa)
Vão de cisalhamento (Ls)	R-2200/147/1.2/300/35/232	2200	147	1.2	720	300	35	232
	R-2200/147/1.2/600/35/232	2200	147	1.2	720	600	35	232
	R-2200/147/1.2/900/35/232	2200	147	1.2	720	900	35	232
Espessura da fôrma de aço (t)	R-2200/147/1/500/35/232	2200	147	1	720	500	35	232
	R-2200/147/1.2/500/35/232	2200	147	1.2	720	500	35	232
	R-2200/147/1.5/500/35/232	2200	147	1.5	720	500	35	232
Altura da Laje de Concreto (h)	R-2200/100/1.2/500/35/232	2200	100	1.2	720	500	35	232
	R-2200/200/1.2/500/35/232	2200	200	1.2	720	500	35	232
	R-2200/250/1.2/500/35/232	2200	250	1.2	720	500	35	232
Resistência a compressão do concreto (fc)	R-2200/147/1.2/500/25/232	2200	147	1.2	720	500	25	232
	R-2200/147/1.2/500/30/232	2200	147	1.2	720	500	30	232
	R-2200/147/1.2/500/40/232	2200	147	1.2	720	500	40	232
Resistência a compressão da fôrma de aço (fy)	R-2200/147/1.2/500/35/250	2200	147	1.2	720	500	35	250
	R-2200/147/1.2/500/35/300	2200	147	1.2	720	500	35	300
	R-2200/147/1.2/500/35/350	2200	147	1.2	720	500	35	350

Tabela 2.10 – Análise paramétrica das lajes reentrantes de maior comprimento (R-3800).

Parâmetro	Espécime	L (mm)	h (mm)	t (mm)	b (mm)	Ls (mm)	fc (MPa)	fy (GPa)
Vão de cisalhamento (Ls)	R-3800/148/1.2/300/35/232	3800	148	1.2	720	300	35	232
	R-3800/148/1.2/600/35/232	3800	148	1.2	720	600	35	232
	R-3800/148/1.2/900/35/232	3800	148	1.2	720	900	35	232
Espessura da fôrma de aço (t)	R-3800/148/1/900/35/232	3800	148	1	720	900	35	232
	R-3800/148/1.2/900/35/232	3800	148	1.2	720	900	35	232
	R-3800/148/1.5/900/35/232	3800	148	1.5	720	900	35	232
Altura da Laje de Concreto (h)	R-3800/100/1.2/900/35/232	3800	100	1.2	720	900	35	232
	R-3800/200/1.2/900/35/232	3800	200	1.2	720	900	35	232
	R-3800/250/1.2/900/35/232	3800	250	1.2	720	900	35	232
Resistência a compressão do concreto (fc)	R-3800/148/1.2/900/25/232	3800	148	1.2	720	900	25	232
	R-3800/148/1.2/900/30/232	3800	148	1.2	720	900	30	232
	R-3800/148/1.2/900/40/232	3800	148	1.2	720	900	40	232
Resistência a compressão da fôrma de aço (fy)	R-3800/148/1.2/900/35/250	3800	148	1.2	720	900	35	250
	R-3800/148/1.2/900/35/300	3800	148	1.2	720	900	35	300
	R-3800/148/1.2/900/35/350	3800	148	1.2	720	900	35	350

No estudo paramétrico da fôrma reentrante foi inserido a malha eletrosoldada junto a laje de concreto. Esse procedimento foi realizado para uniformizar a modelagem das lajes com fôrma trapezoidal e reentrante. Estudos mostraram que a inserção da malha eletrosoldada não resultou no aumento da carga última alcançada e nem modificou o modo de falha apresentado pelos protótipos. Foi observado apenas uma pequena modificação do trecho pós

pico. Observou-se que a inserção da malha contribuiu para estabilização da seção transversal após a carga última ser alcançada.

2.4.1. Relação entre o momento fletor resistente e o momento de plastificação da seção mista

Nas Tabelas 2.11 e 2.12 são apresentadas as relações entre o momento fletor no meio do vão previsto pelos modelos numéricos e o momento de plastificação da seção transversal mista para a condição de interação total dos modelos estudados. O momento de plastificação da seção mista para a condição de interação total não foi obtida por nenhum dos espécimes, demonstrando que a falha nesses protótipos ocorreu por cisalhamento longitudinal com as lajes na condição de interação parcial.

Tabela 2.11 – Momentos fletores resistentes de plastificação (M_{pl}) dos protótipos com perfil trapezoidal.

ID	M_{pl} (kN.m)	M_{NUM} (kN.m)	$\frac{M_{NUM}}{M_{pl}}$	ID	M_{pl} (kN.m)	M_{NUM} (kN.m)	$\frac{M_{NUM}}{M_{pl}}$
T-1800/150/0.8/300/36.6/309	26.04	12.6	0.5	T-3200/150/0.8/300/36.6/309	26.04	12.52	0.5
T-1800/150/0.8/600/36.6/309	26.04	12.9	0.5	T-3200/150/0.8/600/36.6/309	26.04	12.81	0.5
T-1800/150/1/450/36.6/309	32.11	13.24	0.4	T-3200/150/0.8/900/36.6/309	26.04	12.85	0.5
T-1800/150/1.2/450/36.6/309	38.0	13.8	0.4	T-3200/150/1/800/36.6/309	32.11	13.51	0.4
T-1800/150/1.5/450/36.6/309	46.5	14.64	0.3	T-3200/150/1.2/800/36.6/309	38.0	14.14	0.4
T-1800/100/0.8/450/36.6/309	13.7	86.51	0.6	T-3200/150/1.5/800/36.6/309	46.5	15.13	0.3
T-1800/200/0.8/450/36.6/309	38.4	22.8	0.6	T-3200/100/0.8/800/36.6/309	13.7	10.5	0.8
T-1800/250/0.8/450/36.6/309	50.74	36.6	0.7	T-3200/200/0.8/800/36.6/309	38.4	22.91	0.6
T-1800/150/0.8/450/25/309	25.38	9.8	0.4	T-3200/250/0.8/800/36.6/309	50.74	36.16	0.7
T-1800/150/0.8/450/30/309	25.73	11.51	0.5	T-3200/150/0.8/800/25/309	25.38	9.8	0.4
T-1800/150/0.8/450/40/309	26.16	11.04	0.4	T-3200/150/0.8/800/30/309	25.73	11.68	0.5
T-1800/150/0.8/450/36.6/250	21.31	12.65	0.6	T-3200/150/0.8/800/40/309	26.16	10.4	0.4
T-1800/150/0.8/450/36.6/350	29.31	12.65	0.4	T-3200/150/0.8/800/36.6/250	21.31	12.84	0.6
				T-3200/150/0.8/800/36.6/350	29.31	12.81	0.4

Assim como nos protótipos com fôrma trapezoidal, nos perfis com fôrma reentrante a relação entre os momentos foi inferior a 1, o que indica que todas as lajes apresentaram falha por cisalhamento longitudinal. Comparado às fôrmas trapezoidais, a relação entre os momentos demonstrados pelas lajes com fôrma reentrante foram mais próximas de 1. Ou seja, as lajes reentrantes demonstraram estar mais perto da condição de interação completa e isso se deve ao confinamento do concreto no interior das nervuras das fôrmas reentrantes, permitindo aumento do grau de conexão entre a fôrma de aço e a laje de concreto.

Tabela 2.12 – Momentos fletores resistentes (M_{rd}) dos protótipos com perfil reentrante.

ID	M_{pl} (kN.m)	M_{NUM} (kN.m)	$\frac{M_{NUM}}{M_{pl}}$	ID	M_{pl} (kN.m)	M_{NUM} (kN.m)	$\frac{M_{NUM}}{M_{pl}}$
R-2200/147/1.2/300/35/232	42.36	28.74	0.7	R-3800/148/1.2/300/35/232	42.36	29.22	0.7
R-2200/147/1.2/600/35/232	42.36	34.22	0.8	R-3800/148/1.2/600/35/232	42.36	34.3	0.8
R-2200/147/1.2/900/35/232	42.36	40.51	1.0	R-3800/148/1.2/900/35/232	42.36	39.23	0.9
R-2200/147/1/500/35/232	35.7	31.66	0.9	R-3800/148/1/900/35/232	35.7	34.14	1.0
R-2200/147/1.2/500/35/232	42.36	32.45	0.8	R-3800/148/1.2/900/35/232	42.36	34.9	0.8
R-2200/147/1.5/500/35/232	52.1	33.0	0.6	R-3800/148/1.5/900/35/232	52.1	35.0	0.7
R-2200/100/1.2/500/35/232	26.0	20.57	0.8	R-3800/100/1.2/900/35/232	26.0	22.4	0.9
R-2200/200/1.2/500/35/232	60.81	51.72	0.9	R-3800/200/1.2/900/35/232	60.81	54.1	0.9
R-2200/250/1.2/500/35/232	78.21	75.44	1.0	R-3800/250/1.2/900/35/232	78.21	77.14	1.0
R-2200/147/1.2/500/25/232	41.23	27.90	0.7	R-3800/148/1.2/900/25/232	41.23	31.0	0.8
R-2200/147/1.2/500/30/232	41.9	30.87	0.7	R-3800/148/1.2/900/30/232	41.9	33.4	0.8
R-2200/147/1.2/500/40/232	42.72	34.1	0.8	R-3800/148/1.2/900/40/232	42.72	36.3	0.9
R-2200/147/1.2/500/35/250	45.41	32.45	0.7	R-3800/148/1.2/900/35/250	45.41	34.9	0.8
R-2200/147/1.2/500/35/300	53.71	32.45	0.6	R-3800/148/1.2/900/35/300	53.71	34.9	0.7
R-2200/147/1.2/500/35/350	61.74	32.45	0.5	R-3800/148/1.2/900/35/350	61.74	34.9	0.7

2.4.1.1. Relação entre a resistência ao cisalhamento longitudinal numérica e analítica

Na Tabela 2.13 são comparadas as relações entre a resistência ao cisalhamento longitudinal numérica e analítica, em que a resistência última corresponde a carga última dividida por dois. Os valores analíticos foram obtidos a partir do método $m-k$ a partir dos coeficientes m e k obtidos pelos autores Bai et al (2020) e Li et al (2017) por meio dos ensaios experimentais. Os valores obtidos por Bai et al (2020) foram $m = 231.1 N/mm^2$ e $k = -0.17 N/mm^2$ para as lajes trapezoidais. Para as fôrmas com perfis reentrantes, Li et al (2017) obteve $m = 159.6 N/mm^2$ e $k = 0.22 N/mm^2$.

No método $m-k$ desconsidera-se a resistência da laje de concreto ou a resistência ao escoamento. Por esse motivo, como pode ser visto na Tabela 2.13, o modelo não foi capaz prever o aumento da capacidade última das lajes mistas provocado pelo aumento da resistência da laje de concreto ou pelo aumento da resistência ao escoamento da fôrma. Além disso, observa-se que, de modo geral, a resistência ao cisalhamento obtida de modo analítico apresenta regular aproximação a obtida numericamente.

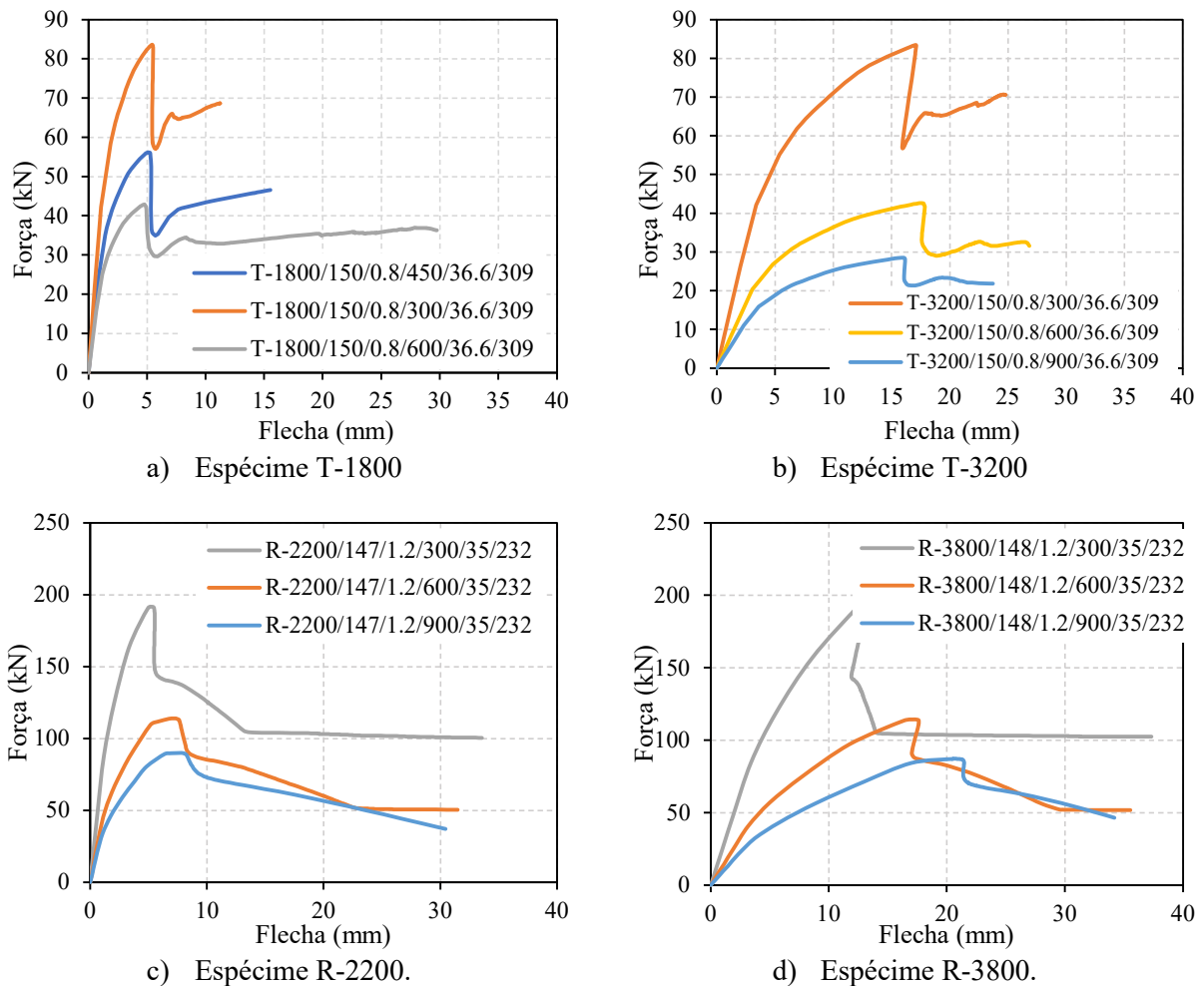
Tabela 2.14 – Método m-k para as lajes mistas trapezoidais e reentrantes.

Lajes Trapezoidais				Lajes Reentrantes			
ID	VuNum (kN)	Vu _{m-k} (kN)	$\frac{Vu_{m-k}}{Vu_{Num}}$	ID	VuNum (kN)	Vu _{m-k} (kN)	$\frac{Vu_{m-k}}{Vu_{Num}}$
T-1800/150/0.8/300/36.6/309	41.8	57.5	1.4	R-2200/147/1.2/300/35/232	95.8	124.2	1.3
T-1800/150/0.8/600/36.6/309	21.5	22.2	1.0	R-2200/147/1.2/600/35/232	54	72.4	1.3
T-1800/150/1/450/36.6/309	29.4	45.7	1.6	R-2200/147/1.2/900/35/232	45.0	55.1	1.2
T-1800/150/1.2/450/36.6/309	30.6	57.5	1.9	R-2200/147/1/500/35/232	63.3	72.4	1.1
T-1800/150/1.5/450/36.6/309	32.5	75.1	2.3	R-2200/147/1.2/500/35/232	64.9	82.8	1.3
T-1800/100/0.8/450/36.6/309	19.2	18.7	1.0	R-2200/147/1.5/500/35/232	66.0	98.3	1.5
T-1800/200/0.8/450/36.6/309	50.7	49.2	1.0	R-2200/100/1.2/500/35/232	41.2	52.8	1.3
T-1800/250/0.8/450/36.6/309	81.3	64.5	0.8	R-2200/200/1.2/500/35/232	103.4	116.5	1.1
T-1800/150/0.8/450/25/309	21.8	34	1.6	R-2200/250/1.2/500/35/232	150.9	148.4	1.0
T-1800/150/0.8/450/30/309	25.6	34	1.3	R-2200/147/1.2/500/25/232	55.8	82.8	1.5
T-1800/150/0.8/450/40/309	24.5	34	1.4	R-2200/147/1.2/500/30/232	61.7	82.8	1.3
T-1800/150/0.8/450/36.6/250	28.1	34	1.2	R-2200/147/1.2/500/40/232	68.1	82.8	1.2
T-1800/150/0.8/450/36.6/350	28.1	34	1.2	R-2200/147/1.2/500/35/250	64.9	82.8	1.3
T-3200/150/0.8/300/36.6/309	41.7	57.5	1.4	R-2200/147/1.2/500/35/300	64.9	82.8	1.3
T-3200/150/0.8/600/36.6/309	21.3	22.2	1	R-2200/147/1.2/500/35/350	64.9	82.8	1.3
T-3200/150/0.8/900/36.6/309	14.3	10.4	0.7	R-3800/148/1.2/300/35/232	97.4	124.2	1.3
T-3200/150/1/800/36.6/309	16.9	20	1.2	R-3800/148/1.2/600/35/232	57.2	72.4	1.3
T-3200/150/1.2/800/36.6/309	17.7	26.6	1.5	R-3800/148/1.2/900/35/232	43.6	55.1	1.3
T-3200/150/1.5/800/36.6/309	18.9	36.5	1.9	R-3800/148/1/900/35/232	42.7	49.4	1.2
T-3200/100/0.8/800/36.6/309	13.1	7.4	0.6	R-3800/148/1.2/900/35/232	43.6	55.1	1.3
T-3200/200/0.8/800/36.6/309	28.6	19.4	0.7	R-3800/100/1.2/900/35/232	28.0	35.2	1.3
T-3200/250/0.8/800/36.6/309	45.2	25.4	0.6	R-3800/200/1.2/900/35/232	67.6	77.6	1.2
T-3200/150/0.8/800/25/309	12.2	13.4	1.1	R-3800/250/1.2/900/35/232	96.4	98.8	1.0
T-3200/150/0.8/800/30/309	14.6	13.4	0.9	R-3800/148/1.2/900/25/232	38.7	55.1	1.4
T-3200/150/0.8/800/40/309	13	13.4	1.0	R-3800/148/1.2/900/30/232	41.7	55.1	1.3
T-3200/150/0.8/800/36.6/250	16.1	13.4	0.8	R-3800/148/1.2/900/40/232	45.4	55.1	1.2
T-3200/150/0.8/800/36.6/350	16	13.4	0.8	R-3800/148/1.2/900/35/250	43.6	55.1	1.3
				R-3800/148/1.2/900/35/300	43.6	55.1	1.3
				R-3800/148/1.2/900/35/350	43.6	55.1	0.8

2.4.2. Vão de cisalhamento (L_s)

O vão de cisalhamento (L_s) é um dos fatores que mais influenciam na capacidade última das lajes mistas. Como pode ser observado na Figura 2.21, a relação entre o vão de cisalhamento e a carga última é inversamente proporcional, ou seja, quanto menor o L_s maior a capacidade última suportada pelas lajes. Essa relação pode ser observada nas lajes mistas com fôrmas trapezoidais e com fôrmas reentrantes.

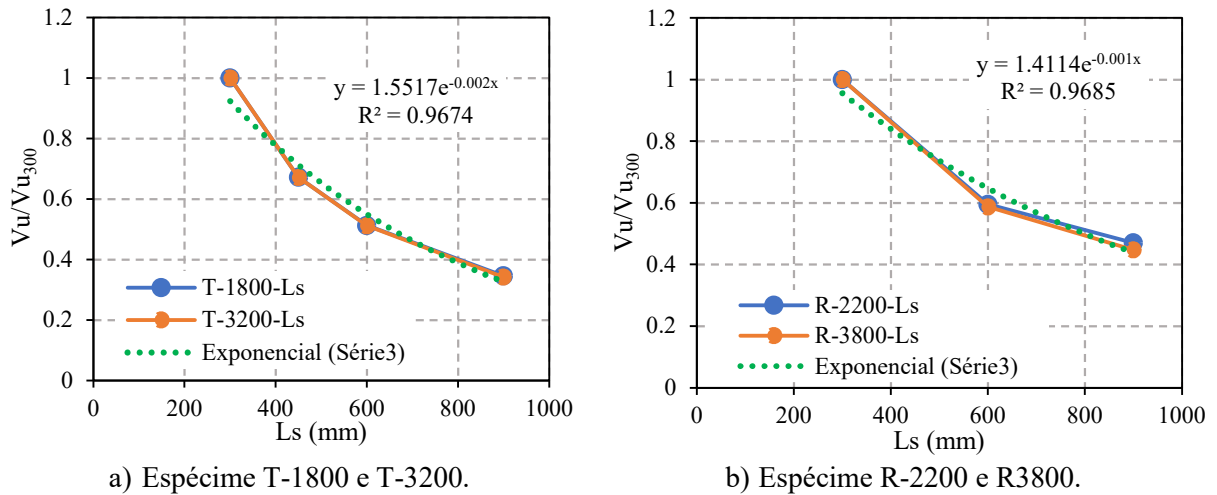
Figura 2.21 – Influência do vão de cisalhamento nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



Fonte: O autor.

Para um mesmo tipo de fôrma, as lajes com diferentes comprimentos totais, mas com mesmo vão de cisalhamento, apresentaram valores de capacidade última da mesma ordem de grandeza, como indicado na Figura 2.22. Na Figura 2.22 V_u corresponde a reação de apoio prevista pelos modelos numéricos e V_{u300} corresponde a carga última máxima alcançada, que correspondente ao protótipo de L_s igual a 300mm. Da Figura 2.22 observa-se que a redução da capacidade última em função do aumento do vão de cisalhamento é maior para as lajes com fôrma trapezoidal do que reentrante. Nas lajes de perfil trapezoidal o aumento no L_s de 600 para 900mm resultou em redução da capacidade última em 17%, enquanto nas lajes de perfil reentrante, a redução foi em torno de 14%. A curva em verde (pontilhada) representa a linha de tendência (exponencial) e observa-se que, tanto para a curva trapezoidal quanto para a reentrante, a equação obtida possui boa precisão, uma vez que o coeficiente de determinação (R^2) se aproxima de 1.

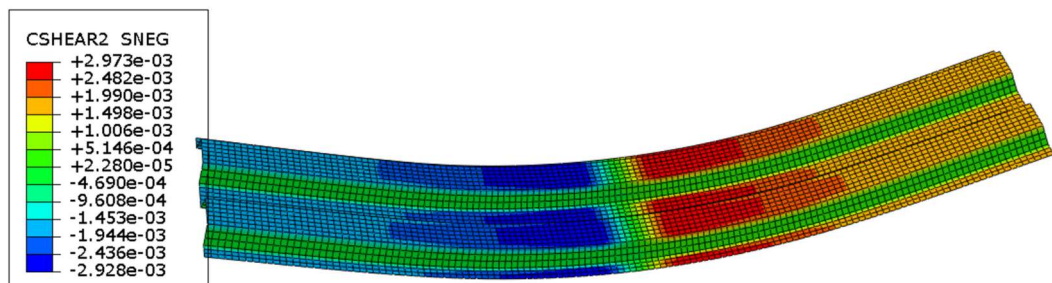
Figura 2.22 – Proporcionalidade da influência do vão de cisalhamento nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.

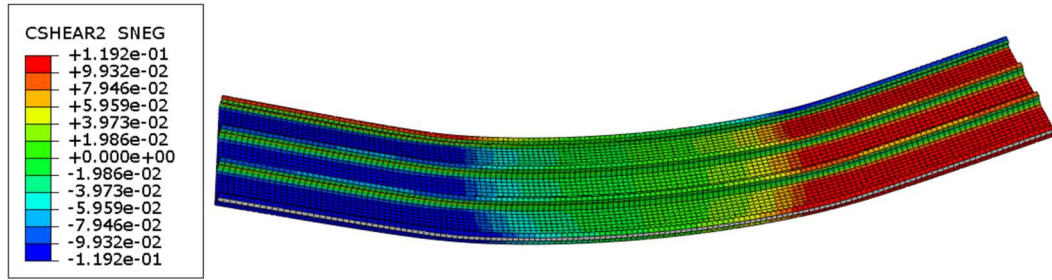


Fonte: O autor.

A partir dos modelos numéricos foi possível observar que a distribuição das tensões cisalhantes não é uniforme ao longo do vão de cisalhamento, sendo maior próximo aos pontos de aplicação de carga. Como esperado, na região de flexão pura, o deslizamento e as tensões cisalhantes são praticamente nulos. Ainda, observou-se que as tensões cisalhantes são maiores nas fôrmas reentrantes do que nas fôrmas trapezoidais, o que pode ser atribuído ao efeito de confinamento do concreto, Figura 2.23. Os resultados observados quanto a influência do vão de cisalhamento também foram observados em trabalhos que estão presentes na literatura (BAI et al, 2020; HOSSAIN et al., 2019; CHEN; SHI, 2014; CHEN et al., 2011; GHOLAMHOSEINI et al., 2014).

Figura 2.23 – Tensões cisalhantes em lajes mistas com perfil trapezoidal e perfil reentrante.





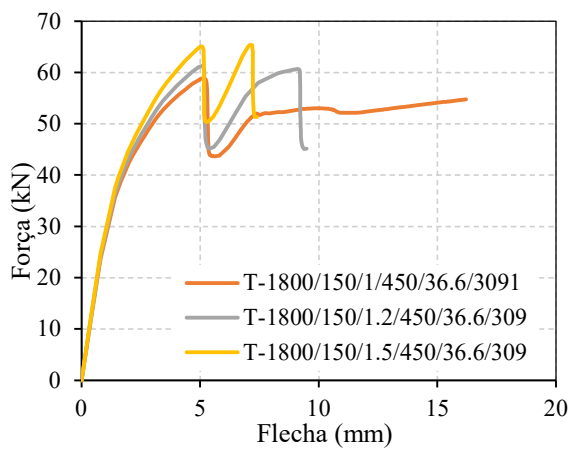
b) Espécime D-R-Ls900.

Fonte: O autor.

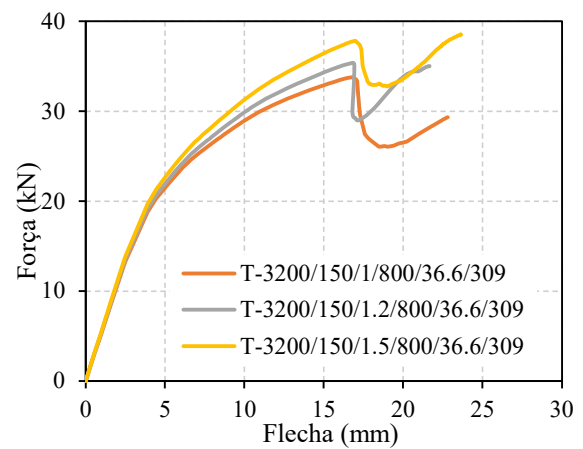
2.4.3. Espessura da fôrma de aço (t)

A Figura 2.24 mostra a influência da espessura da fôrma no comportamento das lajes mistas com fôrmas trapezoidais e reentrantes. O aumento da espessura resulta no aumento da rigidez da laje mista devido a sua contribuição ao aumento do momento de inércia da fôrma de aço. Além da rigidez, observa-se também o aumento da capacidade última das lajes mistas.

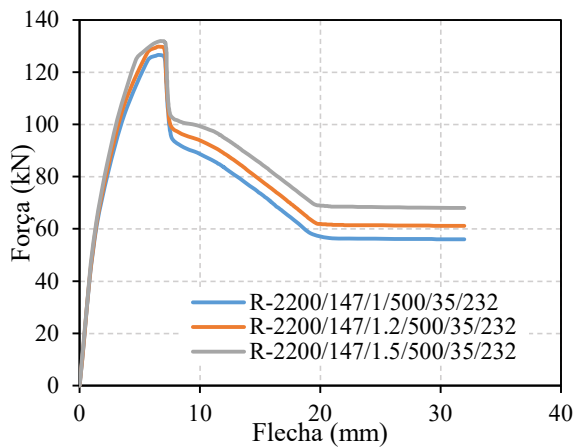
Figura 2.24 – Influência da espessura da fôrma nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



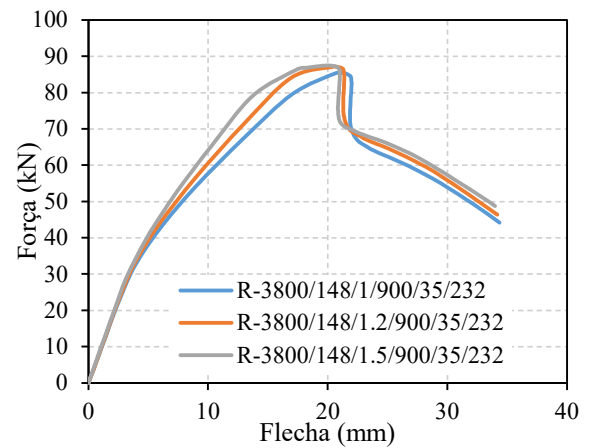
a) Espécime T-1800



b) Espécime T-3200



c) Espécime R-2200.

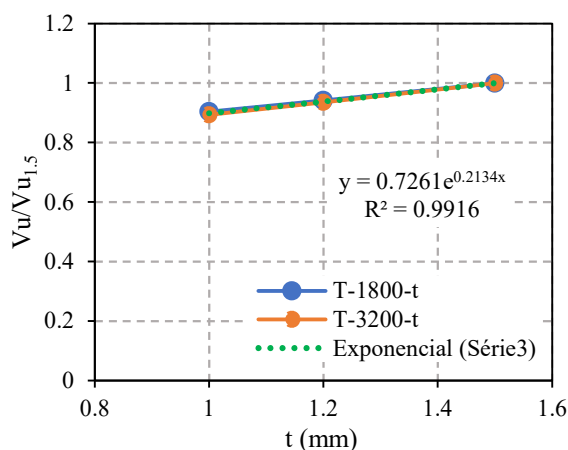


d) Espécime R-3800.

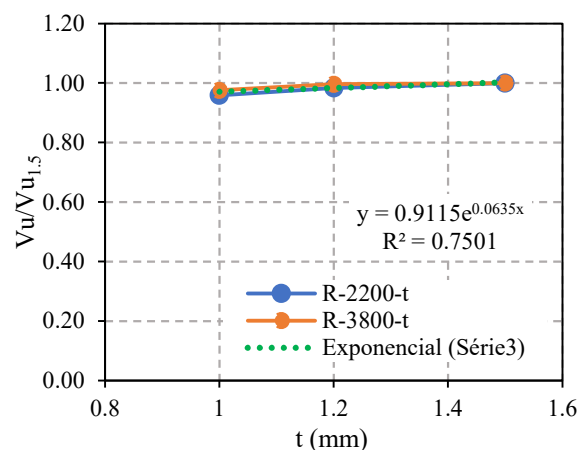
Fonte: O autor.

Na Figura 2.25 é ilustrada a reação entre a reação de apoio V_u e a reação $V_{u1.5}$ que corresponde a carga última máxima que é referente ao protótipo com espessura da fôrma de aço de 1.5mm. No caso das lajes mistas trapezoidais, o aumento da espessura da fôrma resultou no aumento da capacidade última nas lajes mistas em torno de 6%, enquanto, nas lajes com fôrmas reentrantes, a contribuição se mostrou menor, em torno de 2%. Em verde (pontilhada) nas figuras está representado a linha de tendência (exponencial). Para os perfis trapezoidais a equação obtida se adequa de forma precisa aos resultados, enquanto nas lajes reentrantes o coeficiente de determinação (R^2) é de 0.75.

Figura 2.25 – Proporcionalidade da influência da espessura da fôrma nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



a) Espécime T-1800-t e T-3200-t.



b) Espécime R-2200-t e R3800-t.

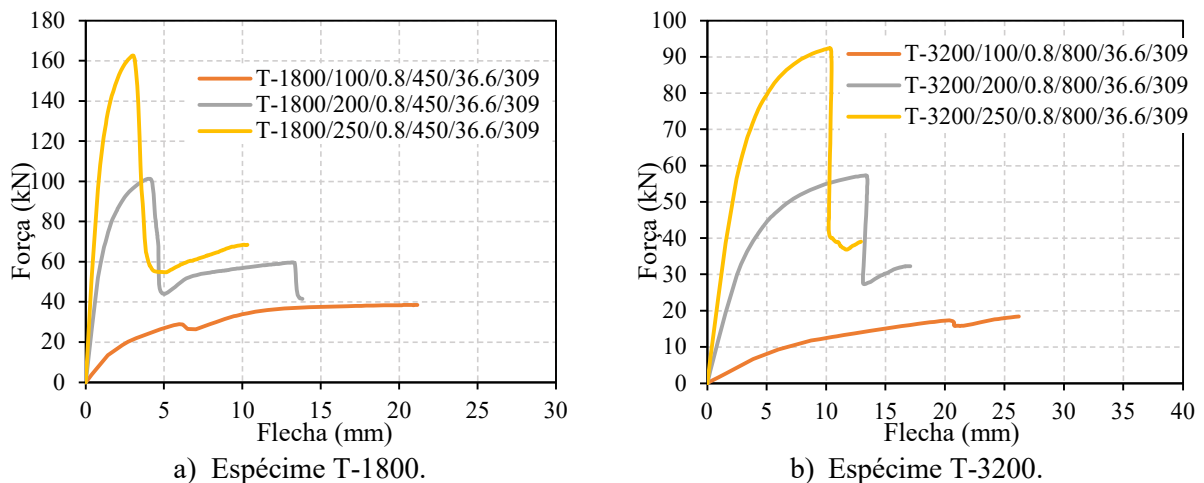
Fonte: O autor.

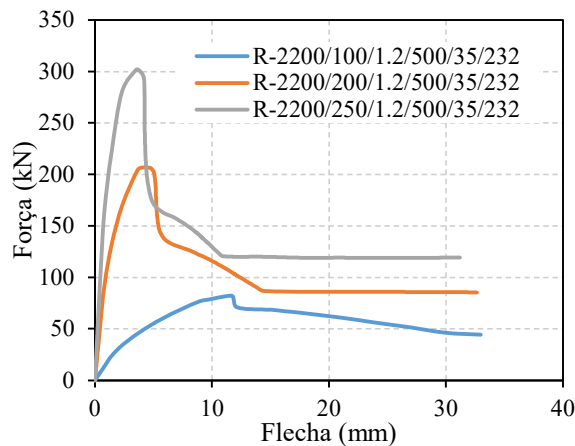
Cifuentes e Medina (2013) indicam que a contribuição na capacidade última da espessura da fôrma se dá principalmente em fôrmas com mossas. O aumento da espessura resulta no aumento da resistência à flexão local das mossas, resultando no aumento das forças de interação e reduzindo a tendência de separação dos materiais. Nesse sentido, o aumento da rigidez da fôrma de aço, resulta em uma maior resistência ao cisalhamento longitudinal e, por consequência, no aumento da capacidade última das lajes mistas. Como no modelo não foram discretizadas as mossas, esse efeito não foi reproduzido no modelo numérico. Assim, o aumento previsto pelos modelos numéricos está associado apenas ao aumento da área de aço e não considera o enrijecimento das mossas que poderiam resultar no aumento da resistência ao cisalhamento longitudinal da interface. Assim, o aumento na capacidade última pode ser ainda maior do que aquele previsto nos modelos numéricos.

2.4.4. Altura da laje de concreto (h)

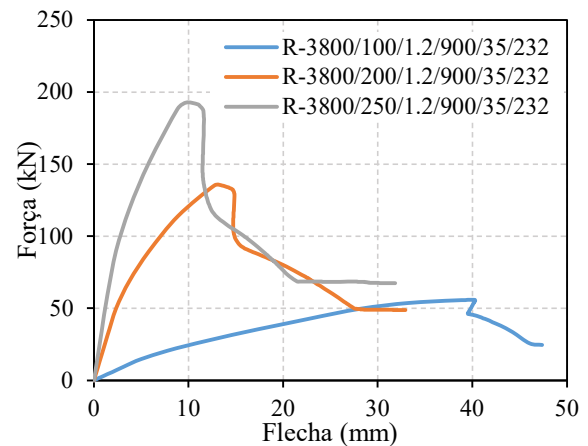
A altura da laje de concreto é um parâmetro que possui grande influência no comportamento e na capacidade última de lajes mistas sem conectores de cisalhamento, como mostra a Figura 2.26. Observa-se que o aumento de h resulta no aumento da capacidade última e na redução da deformação de pico das lajes, em comportamento mais rígido. Esse aumento da rigidez deve-se ao aumento da inércia da seção transversal da laje mista.

Figura 2.26 – Influência da altura da laje de concreto nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.





c) Espécime R-2200.



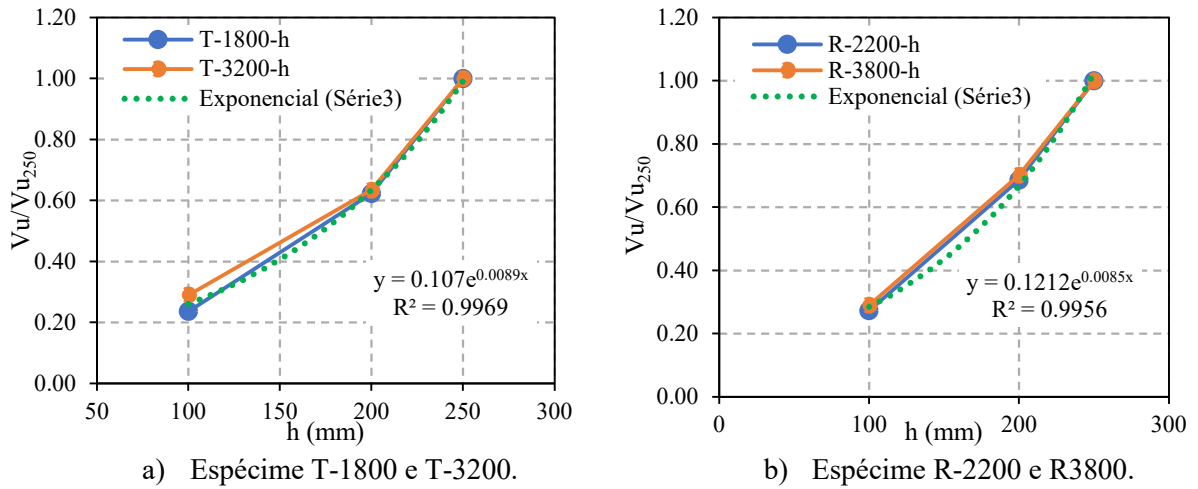
d) Espécime R-3800.

Fonte: O autor.

Na Figura 2.27 é apresentado a relação entre a carga última (V_u) em relação a carga última máxima (V_{u250}) que ocorreu nos protótipos de altura da laje de concreto 250mm. A influência da altura da laje de concreto foi maior nos protótipos reentrantes. Isso ocorre devido a geometria das fôrmas reentrantes que permitem o confinamento do concreto nas nervuras, o que dificulta o deslizamento relativo entre os materiais.

Observa-se que o aumento da altura nas lajes de concreto possui a mesma influência na taxa de aumento da capacidade última nas lajes de perfis trapezoidais de menor comprimento. Desse modo, no grupo T-1800, o aumento na altura da laje de 100 para 200mm e de 200 para 250mm, resulta no aumento de 38% na capacidade última, enquanto nas lajes de maior comprimento (T-3200) esse aumento é de 34% (para altura mudando de 100 para 200mm) e 37% (altura de 200 para 250mm). Nas lajes de perfis reentrantes não foi observada diferença na taxa de aumento da capacidade última para diferentes comprimentos. Desse modo, independente do comprimento da laje, o aumento da altura da laje de concreto de 100 para 200mm resultou no aumento da capacidade última de 41%, enquanto de 200 para 250mm o aumento foi de 31%. A linha de tendência (exponencial) foi traçada e está destacada em verde (pontilhada) na figura. Observa-se que a equação obtida expressa com exatidão os resultados, com coeficiente de determinação (R^2) próximo de 1.

Figura 2.27 – Proporcionalidade da influência da altura da laje de concreto nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.

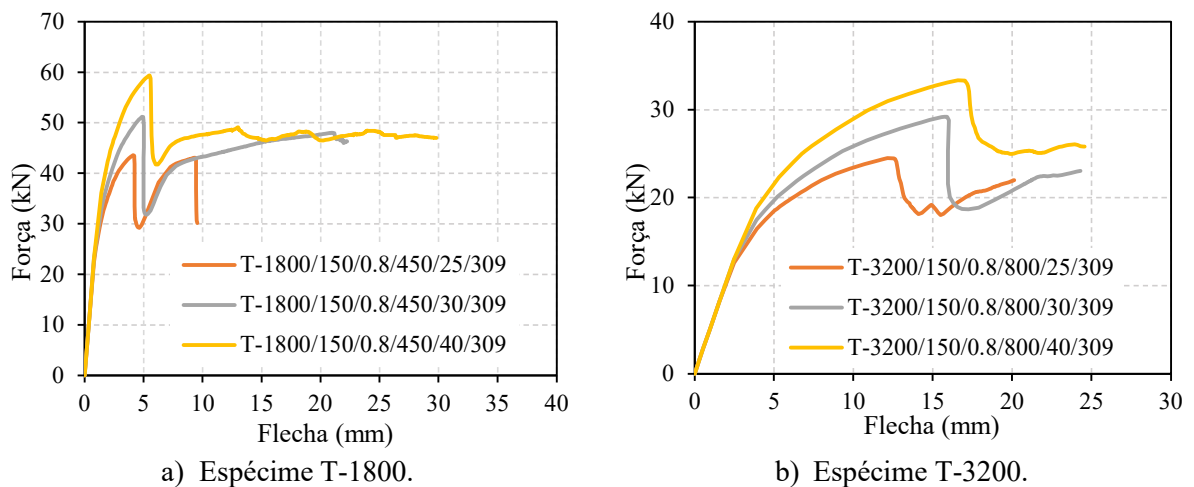


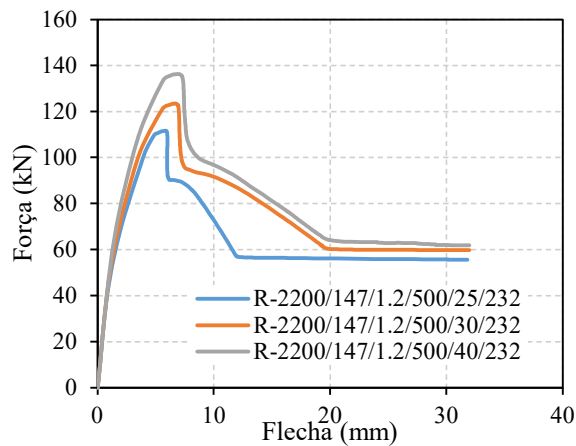
Fonte: O autor.

2.4.5. Resistência à compressão do concreto (f_c)

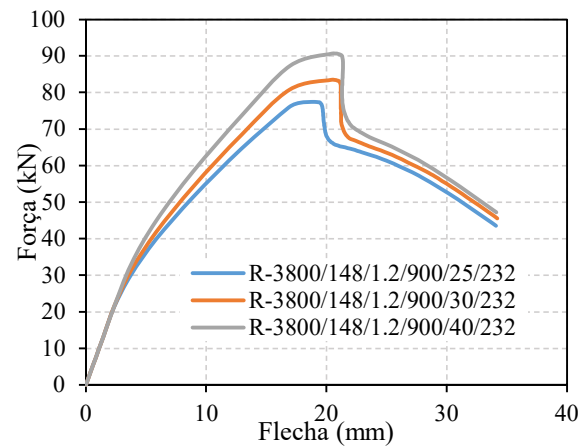
Tanto nas lajes mistas com perfil trapezoidal, quanto nas lajes mistas com perfil reentrante, o aumento da resistência à compressão da laje de concreto resultou no aumento da capacidade última das lajes mistas, Figura 2.28. A resistência da laje de concreto demonstrou ser mais significativa nas lajes com perfil reentrantes, o que era esperado já que nas fôrmas trapezoidais não é observado o confinamento do concreto no interior das nervuras.

Figura 2.28 – Influência da resistência à compressão do concreto nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.





c) Espécime R-2200.

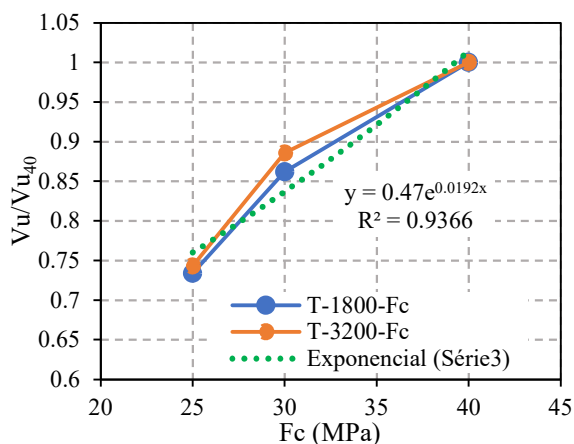


d) Espécime R-3800.

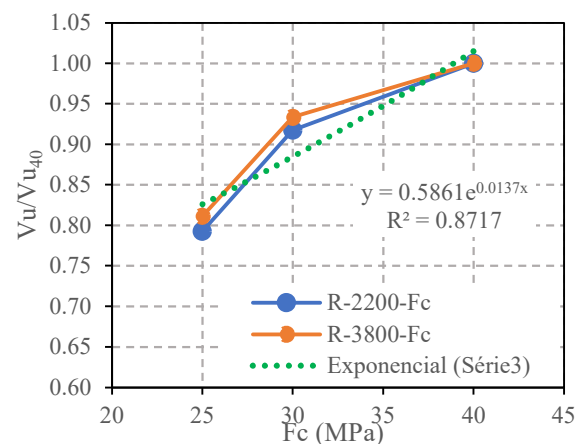
Fonte: O autor.

Nas lajes trapezoidais, grupo T-1800, por exemplo, na variação no f_c de 25 para 30 resulta em 10% de aumento na capacidade última. Enquanto nas lajes reentrante do grupo R-2200, por exemplo, o aumento é de 13%. Esse comportamento deve-se ao efeito de confinamento do concreto que gerado pela geometria das fôrmas reentrantes, o que não é possível no caso das lajes trapezoidais. A Figura 2.29 relaciona a capacidade última (V_u) com a capacidade última máxima (V_{u40}) que ocorre nas lajes mistas com f_c de 40MPa. Foi traçada a linha de tendência (exponencial), linha verde (pontilhada). Observa-se que a equação obtida expressa com boa precisão os resultados obtidos.

Figura 2.29 – Proporcionalidade da Influência da resistência a compressão do concreto nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



a) Espécime T-1800 e T-3200.



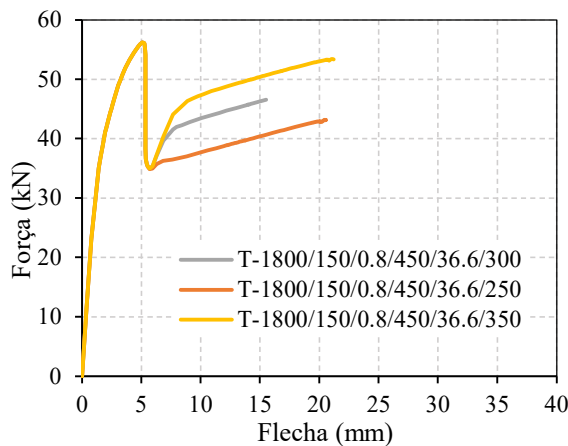
b) Espécime R-2200 e R3800.

Fonte: O autor.

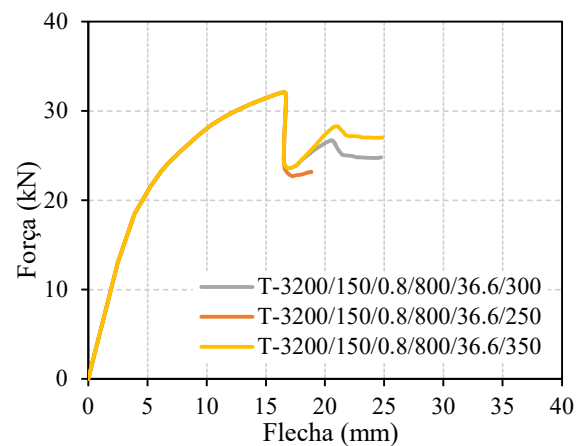
2.4.6. Resistência ao escoamento da fôrma de aço (f_y)

Na Figura 2.30 é ilustrado a influência da resistência ao escoamento da fôrma de aço (f_y) no comportamento das lajes mistas. Dos resultados, observa-se que, tanto nas lajes com fôrma reentrante quanto trapezoidais, o aumento da resistência ao escoamento da fôrma, modificou apenas o comportamento pós-pico. Após o pico, a laje de concreto já está fissurada e há redução da resistência ao cisalhamento longitudinal da interface, fazendo com que a fôrma de aço se torne mais solicitada. Esse comportamento, explica a contribuição da forma somente após o pico. Outro ponto, é que na falha por cisalhamento longitudinal, a falha ocorre devido à degradação da resistência da interface, o que pode ou não ocorrer associado ao escoamento da fôrma de aço. Desse modo, a resistência ao escoamento de aço, só irá impactar de modo significativo na resistência das lajes mistas, quanto mais a falha se aproximar da falha por flexão.

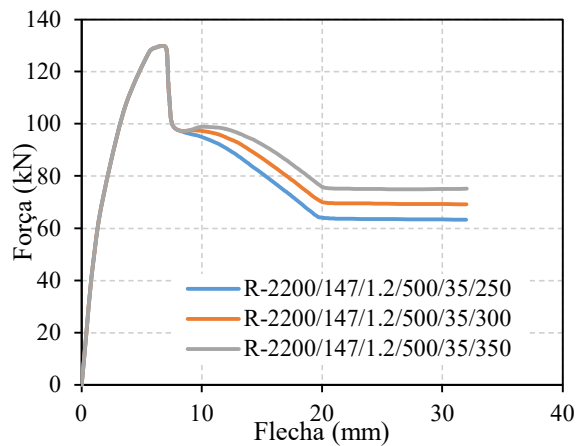
Figura 2.30 – Influência da resistência ao escoamento nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



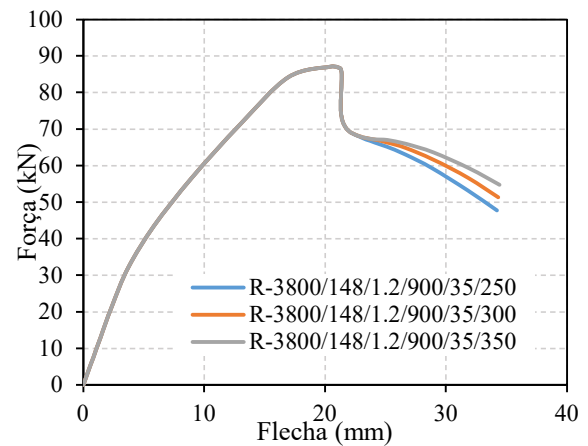
a) Espécime T-1800.



b) Espécime T-3200.



c) Espécime R-2200.

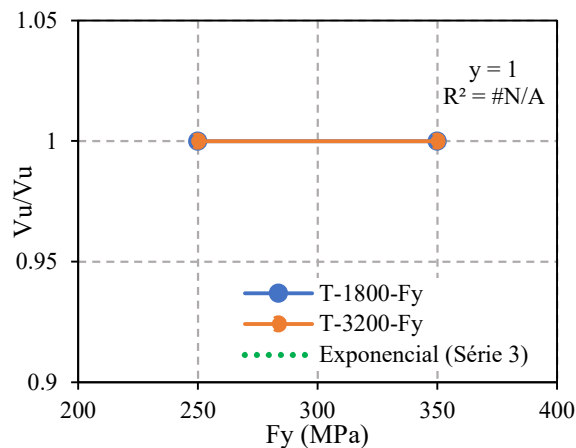


d) Espécime R-3800.

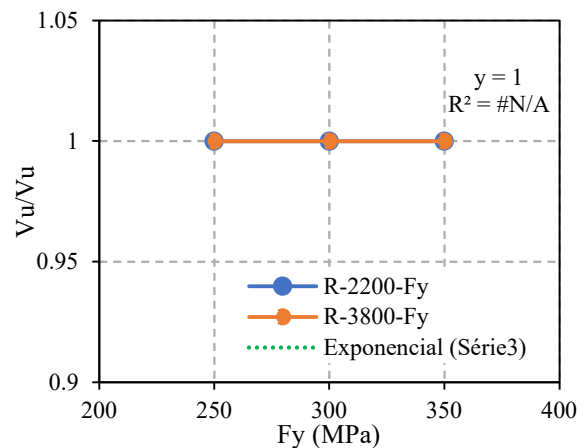
Fonte: O autor.

A Figura 2.31 relaciona a carga última (V_u) com a carga última máxima que, nesse caso, também será dado por V_u , uma vez que não houve variação na capacidade última com a alteração da resistência ao escoamento da fôrma de aço. A curva de tendência (exponencial) foi traçada, contudo ela não se aplica, uma vez que a equação seria uma reta horizontal ($y=1$).

Figura 2.31 – Proporcionalidade da Influência da resistência ao escoamento nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



a) Espécime T-1800 e T-3200.



b) Espécime R-2200 e R3800.

Fonte: O autor.

2.5. Conclusão

A partir do estudo paramétrico pode-se concluir:

1. Os principais fatores que influenciam a capacidade última das lajes mistas de aço e concreto sem conector de cisalhamento são: o vão de cisalhamento e a altura da

laje de concreto a ser depositada sobre a fôrma de aço. A influência desses parâmetros é maior nas lajes de perfil reentrante e isso se deve a geometria da fôrma que permite o confinamento do concreto nas suas nervuras e dificulta o deslizamento relativo entre os materiais;

2. Os resultados obtidos a partir de lajes com diferentes comprimentos e mesmo vão de cisalhamento resultaram em valores próximos, indicando que o vão de cisalhamento, e não o comprimento da laje, é o parâmetro que mais afeta a capacidade última das lajes mistas;
3. Lajes mistas com fôrmas reentrantes possuem modo de falha mais dúctil do que lajes mistas com fôrmas trapezoidais e isso pode ser atribuído ao efeito de confinamento do concreto;
4. A resistência ao escoamento da fôrma de aço influencia apenas o comportamento pós-pico das lajes mistas, tornando-os mais dúcteis;
5. Todas as lajes mistas obtiveram como modo de falha a falha ao cisalhamento longitudinal. Nesse modo de falha, observa-se a fissuração da laje de concreto que resultam em descolamento entre o concreto e a fôrma metálica nos pontos de fissuras, o que leva ao deslizamento entre a fôrma de aço e a laje de concreto, seguida de uma redução repentina na carga.

Como sugestão de trabalhos futuros, destaca-se a avaliação da espessura da fôrma de aço considerando a discretização das moedas na interface aço-concreto.

CAPÍTULO 3. ESTUDO PARAMÉTRICO E ANALÍTICO DA INFLUÊNCIA DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO NA CAPACIDADE ÚLTIMA DE LAJES MISTAS DE AÇO E CONCRETO

Resumo:

Os conectores de cisalhamento promovem a ligação entre a laje mista e a viga de aço, resultando no piso misto. Embora não seja sua função principal, os conectores de cisalhamento contribuem para o aumento da resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas, uma vez que impede o livre deslizamento relativo entre a fôrma de aço e o concreto. Tal contribuição é comumente desconsiderada no dimensionamento das lajes mistas, o que pode estar associado à falta de informações que permitam quantificar a contribuição desses para a capacidade última das lajes mistas. Nesse contexto, um estudo paramétrico foi conduzido com o objetivo de avaliar a influência de diferentes parâmetros geométricos e mecânicos da laje mista e dos conectores do tipo pino com cabeça nos comportamentos global e local das lajes mistas com conectores. Além disso, a capacidade última das lajes mistas foi avaliada a partir do método m-k, observando as recomendações descritas nas normas ABNT NBR 8800 (2008) e no Eurocode 4:1994, e do método de avaliação descrito no trabalho de Bai et al (2020) e na norma inglesa BS5950-Part4. Os resultados evidenciaram a contribuição dos conectores de cisalhamento na capacidade última das lajes mistas, uma vez que impedem o livre deslizamento relativo entre os materiais. Foi possível traçar correlações entre as variáveis estudadas e a capacidade última, em que foi obtido equação de regressão exponencial com boa aproximação. Além disso, a capacidade última numérica e a prevista analiticamente foram comparadas e foi obtido regular aproximação.

3.1. Introdução

As lajes mistas de aço e concreto são formadas pela associação de uma fôrma de aço formada a frio e a laje de concreto moldada in loco (GROSSI et al. 2020; HOSSAIN et al., 2016; JIANG et al., 2019; BAI et al., 2020; LI et al., 2017). Nesse sistema, a transferência dos esforços entre a fôrma de aço e a laje de concreto é alcançada a partir de mecanismos existentes na interface aço-concreto. Nas lajes mistas, existe três principais mecanismos responsáveis pela transferência dos esforços na interface, são eles: a ligação química, por atrito e mecânica (GOLAMHOSEINI et al., 2014; MISTAKIDIS; DIMITRIADIS, 2008).

A ligação química é resultado da aderência entre a pasta de cimento e a fôrma de aço; a ligação por atrito é devido as rugosidades entres os materiais, a ser mobilizada a partir do início do deslizamento relativo; a ligação mecânica ocorre devido a presença de mecanismos físicos presentes na interface, como os relevos impressos na fôrma de aço e os conectores de cisalhamento.

Embora sejam utilizados para a composição das vigas mistas, os conectores de cisalhamento restringem ao livre deslizamento relativo entre a laje de concreto e a fôrma metálica, resultando no aumento do grau de conexão entre os materiais e no aumento da capacidade resistente e da rigidez após o início do deslizamento relativo das lajes mistas (BAI et al., 2020). A rigidez inicial do sistema, antes da ruptura da adesão, permanece igual ao das lajes sem conectores, pois esses só são mobilizados após a ruptura da adesão (TAHIR et al., 2009).

O comportamento estrutural das lajes mistas é comumente avaliado a partir de ensaios de flexão realizados em protótipos em escala real (CIFUENTES; MEDINA, 2013; RIOS et al., 2017; HOSSAIN et al., 2019; BAI et al., 2020; LI et al., 2017). Nesses ensaios, os efeitos da força normal e curvatura assumida pela laje na flexão são adequadamente reproduzidos, de modo que o comportamento experimental se assemelha ao de lajes mistas em serviço.

Desses ensaios, foi observado que as lajes mistas possuem três principais modos de falha, os quais determinam a capacidade última das lajes mistas e estão relacionados ao grau de conexão entre os materiais e o comprimento do vão cisalhante (GHOLAMHOSEINI et al., 2014). Os três principais modos de falha das lajes mistas são: falha por cisalhamento vertical, falha por flexão e falha por cisalhamento longitudinal. A ruptura por cisalhamento vertical é resultado da ação da força cortante na região dos apoios, levando ao aparecimento de fissuras próximo a essa região (SHIRGAONKAR; PATIL, Y.D; PATIL, H.S, 2021; SIMON;

VISUVASAM; BABU, 2017). A falha por flexão acontece devido a formação de uma rótula plástica na região do meio do vão; enquanto a falha por cisalhamento longitudinal ocorre devido ao esgotamento da capacidade resistente da interface em transferir as tensões cisalhantes entre os materiais, ocorrendo em lajes em interação parcial (BAI et al, 2020; MOHAMMED et al, 2016; AHMED; TSVDARIDIS, 2019; SHIRGAONKAR; PATIL, Y. D; PATIL, H.S, 2021; ABDULLAH; EASTERLING, 2009).

Nas lajes mistas de aço e concreto sem conector de cisalhamento a falha por cisalhamento longitudinal é o modo mais comum nas lajes com comprimentos usuais (BAI et al., 2020, AHMED; TSVDARIDIS, 2019; PEREIRA et al., 2019; MOHAMMED et al., 2016) enquanto, nas lajes com conectores de cisalhamento, a depender do comportamento da interface, é possível observar também a falha à flexão.

As normas de dimensionamento apresentam dois modelos para avaliação da capacidade última das lajes mistas sem conectores, são eles: o método m-k e o método da interação parcial. Esses métodos necessitam de resultados experimentais de lajes mistas para definição do comportamento da interface aço-concreto. O método m-k é válido para lajes mistas dúcteis e frágeis, já o método da interação parcial é válido apenas para lajes mistas dúcteis. A norma EN 1994-1-1:2004 (EN-4) classifica o comportamento como dúctil quando a carga última excede em, pelo menos, 10% da carga relativa ao deslizamento relativo; caso não ocorra, a laje será considerada como frágil.

Não existe um modelo normatizado que permita a consideração da contribuição dos conectores de cisalhamento para a capacidade última das lajes mistas, o que está atrelado a falta de informações que permitam quantificar o quanto os conectores influenciam na resistência ao cisalhamento da interface e na capacidade última das lajes. Desse modo, por questões de segurança, a contribuição desses para a resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas de aço e concreto é comumente desprezada.

A maioria dos trabalhos existentes na literatura sobre lajes com conectores de cisalhamento são experimentais e contendo um número pequeno de protótipos (BAI et al., 2020; LI et al., 2017; AHMED et al., 2019; SHIRGAONKAR et al., 2021; LIM et al., 2021; LACKI et al., 2019). Dado os custos envolvidos nos ensaios, há pouca quantidade de resultados disponíveis e, conseqüentemente, de variáveis investigadas. Uma das formas de contornar este problema é a utilização de modelos numéricos.

Os modelos numéricos, desde que calibrados e validados, podem ser utilizados na realização de estudos paramétricos. A calibração e validação é comumente feita a partir de

resultados experimentais de um pequeno número de protótipos. Dos modelos, pode-se conduzir estudos paramétricos envolvendo diferentes variáveis e sem a necessidade de realização de novos ensaios experimentais, reduzindo, portanto, custos financeiros e tempo em laboratório.

Autores como John et al. (2020) (BAI et al., 2019; LACKI et al., 2019) propuseram modelos numéricos de lajes mistas com conectores de cisalhamento. No entanto, importantes simplificações relacionadas ao comportamento não linear dos materiais e da interface aço-concreto foram admitidas nesses trabalhos, o que pode limitar a capacidade preditiva do modelo. Outra limitação encontrada, é que muitos autores apenas propuseram o modelo numérico, mas não realizaram estudos paramétricos.

Desse modo, esse trabalho tem como objetivo a realização de um estudo paramétrico onde será investigada a influência de diferentes parâmetros geométricos e mecânicos da laje de concreto, fôrma metálica e dos conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça no comportamento de lajes mistas com conectores de cisalhamento. Para tal, foi realizado uma revisão bibliométrica a fim de contextualizar o estudo dentro da literatura, seguido de revisão de literatura sobre os comportamentos global e local de lajes mistas com conectores de cisalhamento. Em sequência foram propostos modelos numéricos de lajes mistas com fôrmas trapezoidais e reentrantes com conectores do tipo pino com cabeça (*stud bolt*). Os modelos numéricos foram calibrados e validados a partir de estudos experimentais. Dos modelos, foi realizado o estudo paramétrico em que as variáveis vão de cisalhamento, altura da laje de concreto, espessura da fôrma de aço, altura do conector de cisalhamento, resistência à compressão do concreto, módulo de elasticidade do concreto, diâmetro do conector de cisalhamento e quantidade de conectores foram investigadas. Do estudo foram traçadas correlações entre a variável estudada e a capacidade última alcançada pelas lajes mistas. A capacidade última numérica e a prevista analiticamente foram comparadas e resultaram em regular aproximação.

3.2. Revisão de literatura

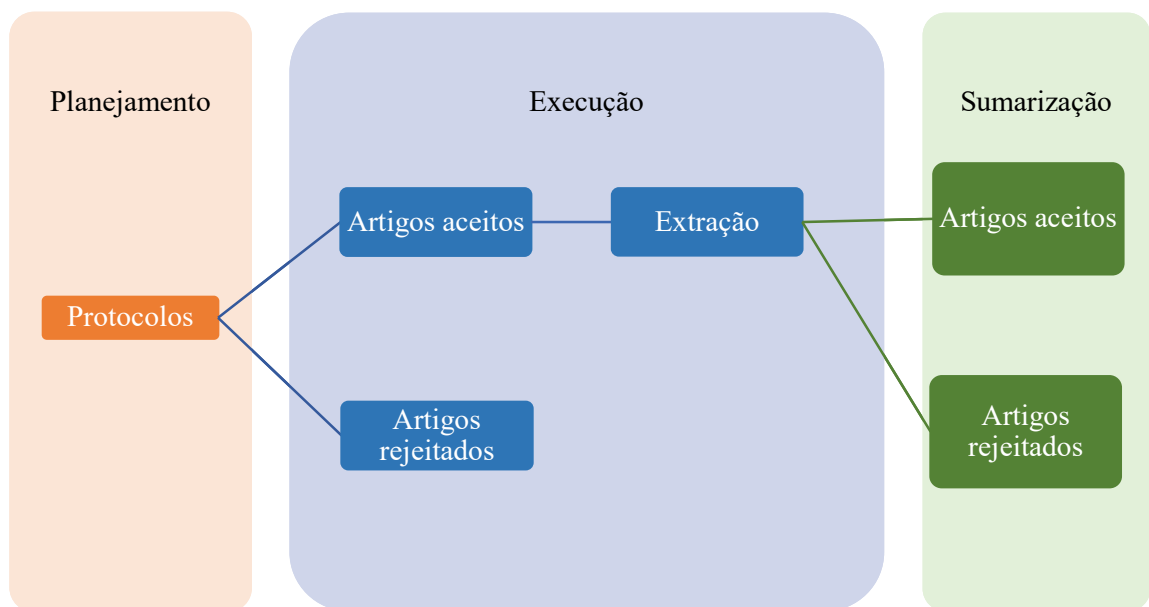
3.2.1. Análise bibliométrica

A revisão sistematizada foi realizada com base nas informações disponibilizadas na base de dados da *Scopus*. O escopo foi limitado aos artigos que possuem como objetivo o estudo do comportamento global e local de lajes mistas de aço e concreto com conectores de

cisalhamento. Os artigos foram selecionados e extraídos utilizando o software de acesso livre StArt[®] disponibilizados pela Universidade Federal de São Carlos.

A análise sistematizada conduzida no software StArt[®] é dividida em três etapas: planejamento, execução e sumarização, Figura 3.1. O planejamento é a fase protocolar na qual são definidos os critérios para a seleção dos artigos. Nessa fase devem ser inseridas as palavras-chave, os critérios de seleção/exclusão e os critérios de extração. As palavra-chave definidas nessa etapa são utilizadas como uma fórmula *TITLE-ABS-KEY* no banco de dados escolhido.

Figura 3.1 - Etapas da revisão bibliométrica no software StArt[®].



Fonte: o autor.

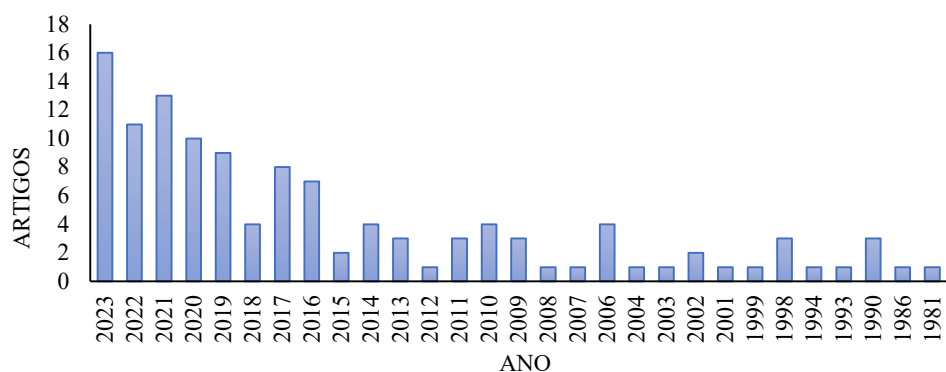
A etapa de execução é dividida em seleção e extração. Na fase de seleção, é possível aceitar ou rejeitar o artigo de acordo com os critérios definidos na etapa protocolar. Os artigos aceitos são direcionados para fase de extração, na qual atribui-se parâmetros de qualidade e de extração aos artigos. Ao final da etapa de extração, é possível, novamente, aceitar ou rejeitar os artigos restantes.

A etapa de sumarização consiste na etapa de obtenção de informativos gráficos da etapa de extração, permitindo a geração de nuvem de palavras-chave, autores que mais publicam, revistas de maior relevância, porcentagem de artigos aceitos/rejeitados, dentre outros.

Na etapa de planejamento foram definidas as palavras-chave *composite slabs AND finite element analysis OR finite modelling AND longitudinal shear behavior OR longitudinal failure AND failure mode*, as quais foram inseridas na fórmula *TITLE-ABS-KEY* no *Science Direct*. Como resultado, foram identificados dois mil duzentos e noventa e quatro (2294) artigos de 1969 até o ano de 2023. No início da fase de seleção, observou-se que muitos textos se referiam a outros tipos de estruturas mistas, principalmente vigas mistas e, por isso, optou-se por refinar a fórmula de entrada.

A segunda busca teve como *TITLE-ABS-KEY: composite slab NOT composite beams NOT composite columns AND shear OR shear bond behaviour OR longitudinal shear behaviour*. Nessa situação foram encontrados 172 artigos em que foram rejeitados 52 artigos se tratar de outros elementos mistos. Os 120 artigos aceitos foram publicados entre 1981 e 2023 e abordavam diferentes assuntos dentro do tema “lajes mistas de aço e concreto”. Dos resultados observou-se que o maior número de publicações ocorreu a partir de 2016, chegando a 16 artigos publicados em 2023, Figura 3.2.

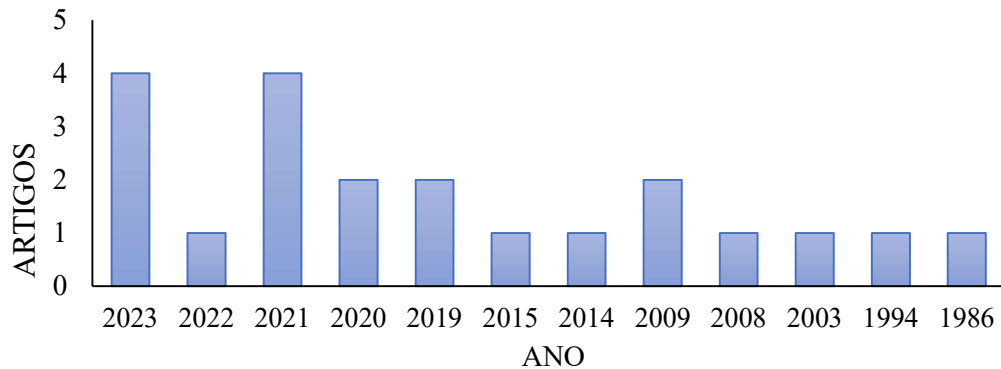
Figura 3.2 – Número de publicações por ano aceitas na fase de seleção.



Fonte: O autor.

Na etapa de extração, foram especificados ao software StArt® os critérios para aceitação/rejeição dos artigos. Desse modo, foi selecionado como “aceito” apenas os artigos relacionados ao estudo dos comportamentos global e local de lajes mistas com conectores de cisalhamento. Como resultado desta etapa, foram identificados 21 artigos que investigavam o comportamento de lajes mistas com conectores de cisalhamento e a distribuição temporal está ilustrada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Número de publicações por ano de lajes mistas de aço e concreto com conectores de cisalhamento.



Fonte: O autor.

Da Figura 3.3, observa-se que a influência dos conectores de cisalhamento no comportamento e na capacidade última das lajes mistas de aço e concreto é um tema recente e que tem sido explorado pelo meio técnico. A distribuição por periódicos da *Science Direct* indica que as publicações de 1986 até 2023 estão concentradas, principalmente, no *Journal of Constructional Steel Research* (7 artigos) e *Engineering Structures* (6 artigos), os 3 artigos restantes estão em outros periódicos.

Da análise bibliométrica foi gerada nuvem de palavras chaves identificadas nos artigos de lajes mistas com conectores, indicada na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Palavras-chave reportadas pelo software StArt.



Fonte: Software Start.

Da revisão sistemática constatou-se que parte significativa dos estudos relacionados a estruturas mistas está voltada para o estudo de vigas mistas de aço e concreto. Além disso, notou-se o interesse crescente da comunidade acadêmica no estudo de lajes mistas, e, mais recentemente, no estudo de lajes mistas com conectores de cisalhamento. Esses fatores mostram a relevância e a necessidade de mais estudos voltados ao estudo dos comportamentos global e local de lajes mistas com conectores de cisalhamento.

3.2.2. Comportamento das lajes mistas sem conector

3.2.2.1. Interface das lajes mistas sem conector

Segundo Calado e Santos (2010), a ação mista entre a fôrma e a laje de concreto pode ser atribuída a conexão e a interação entre os materiais. A conexão está atrelada a capacidade da interface em transferir os esforços cisalhantes entre o aço e o concreto e a interação está relacionada ao deslizamento relativo entre os materiais.

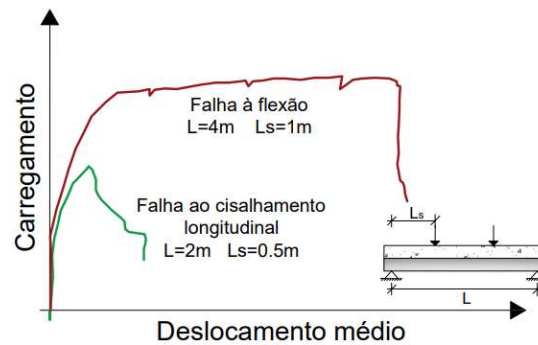
Nos estágios iniciais de carregamento, todas as lajes mistas estão no estágio de conexão total em que há a total transferência dos esforços entre a fôrma de aço e a laje de concreto. À medida que o carregamento aumenta, a laje mista pode assumir o estágio de conexão parcial que ocorre quando a carga de início do deslizamento é alcançada, indicando que a resistência ao cisalhamento longitudinal promovida pela adesão foi ultrapassada. A partir da ruptura da adesão, com o aumento do carregamento, tem-se o esgotamento da capacidade da interface em resistir ao deslizamento entre os materiais e, por consequência, após a carga última, a laje mista deixa de estar em condição de conexão parcial e assume a condição de conexão nula, que corresponde à falha do sistema. A situação descrita corresponde a uma laje mista com falha por cisalhamento longitudinal.

Nas lajes com falha por flexão, a laje mista permanece em conexão total ao longo de todo o histórico de carregamento, assim, toda a solicitação será suportada conjuntamente pelo aço e pelo concreto até que o momento de plastificação da seção transversal, na região de momento máximo, seja alcançado.

A falha por cisalhamento longitudinal é o modo de falha mais comum nas lajes mistas (BAI et al., 2020, AHMED; TSV DARIDIS, 2019; PEREIRA et al., 2019; MOHAMMED et al., 2016). Esse tipo de falha ocorre para menores valores de carregamento quando comparada a falha por flexão, Figura 3.5.

Diversos trabalhos na literatura investigaram os parâmetros que afetam a resistência ao cisalhamento longitudinal da interface aço-concreto com o objetivo de potencializar a conexão na interface aço-concreto (GHOLAMHOSEINI et al., 2014; MARIMUTHU et al., 2007; FERRER et al., 2007; FERRER et al., 2018; SIMON et al., 2017). Ferrer et al (2007) verificaram que o coeficiente de atrito exerce pouca influência na resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas.

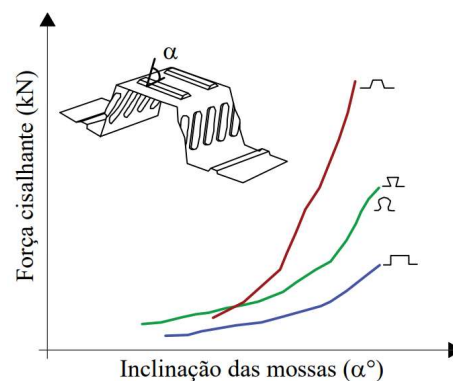
Figura 3.5 - Comparativo da falha à flexão e falha ao cisalhamento longitudinal.



Fonte: Adaptado de Velkovic (1996).

Autores como Ferrer et al (2007) (FERRER et al., 2018; SIMON et al., 2017) investigaram a influência das mossas na resistência ao cisalhamento longitudinal. Segundo Ferrer et al (2007) a inclinação das mossas presentes na face superior da fôrma de aço possui influência significativa no desempenho da resistência ao cisalhamento longitudinal, Figura 3.6, em que pequenas modificações na inclinação dos relevos, implica em um aumento considerável na resistência da interface. Na Figura 3.6 é indicado o aumento da força cisalhante na interface aço-concreto em função da inclinação das mossas, nota-se maior influência nos perfis trapezoidais. Nos perfis trapezoidais é necessário que as mossas apresentem uma inclinação mínima, a fim de evitar a separação vertical entre a fôrma e a laje de concreto.

Figura 3.61 - Influência da inclinação dos relevos em diferentes configurações de fôrmas.



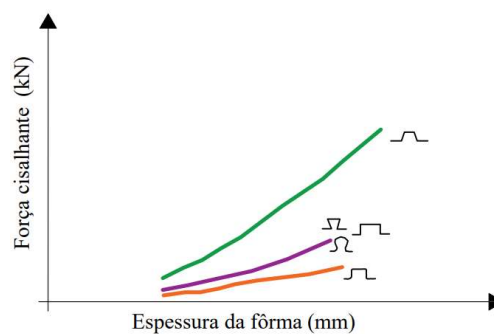
Fonte: Adaptado de Ferrer et al (2007).

Simon et al (2017) investigaram a influência do tamanho e da geometria das mossas na resistência ao cisalhamento longitudinal. Os autores observaram que esses fatores impactam diretamente, por exemplo, em lajes com mossas com geometria quadrada com

tamanho 50% maior que o usual, em que estas apresentaram melhores desempenhos do que as lajes com mossas circulares e retangulares da mesma área.

Diversos autores verificaram que o aumento da espessura da fôrma contribui para o aumento da capacidade última das lajes mistas (LI et al., 2017; FERRER et al., 2007; CIFUENTES; MEDINA, 2013; BAI et al., 2020). Ferrer et al (2007) investigou a influência da espessura da fôrma para diferentes configurações de geometria da fôrma na resistência ao cisalhamento longitudinal, Figura 3.7.

Figura 3.7 - Influência da espessura do deck na capacidade de carga.

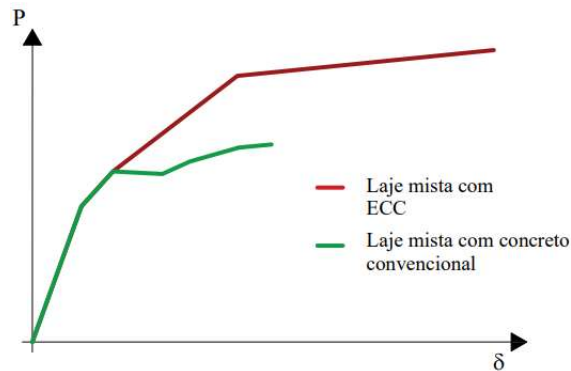


Fonte: Adptado de Ferrer et al (2007).

Os autores Abdullah e Easterling (2009) (LI et al., 2017; BAI et al., 2020) observaram que a esbeltez da laje é um dos parâmetros que mais influenciam na capacidade resistente das lajes mistas de aço e concreto. Estudos mostraram que a capacidade última das lajes mistas reduz com o aumento da esbeltez da laje.

A diferença entre o comportamento dúctil do aço e frágil do concreto resulta nas tensões cisalhantes que surgem na interface aço-concreto, conduzindo ao rápido esgotamento da capacidade última do concreto e reduzindo a capacidade última das lajes mistas de comportamento entre o aço e concreto afeta a resistência ao cisalhamento longitudinal. Mohammed et al (2016) compararam a capacidade última de lajes mistas com concreto convencional e com concreto *Engineered Cementitious Composite* (ECC), Figura 3.8. O ECC é um material compósito, dúctil, de alto desempenho, que resulta numa maior ductilidade à tração, quando comparado ao concreto convencional (BAI et al., 2020). Como resultado, foi observado que o aumento da ductilidade do concreto resultou no aumento da capacidade última das lajes mistas (MOHAMMED et al., 2016; BAI et al., 2020; HOSSAIN et al., 2016).

Figura 3.8 - Capacidade de carga das lajes mistas com concreto convencional e com concreto ECC.



Fonte: Adaptado de Mohammed et al (2016).

3.2.2.2. Modelos analíticos

As lajes mistas podem ter comportamento dúctil ou frágil. A classificação é descrita no EN 1994-1-1:2004, em que o comportamento dúctil ocorre quando a carga última exceder em, pelo menos, 10% da carga relativa ao deslizamento 0.1 mm. Caso contrário, a laje mista será considerada do tipo frágil. De acordo com essa classificação, as normas de dimensionamento, como ABNT NBR 8800 (2008), EN 1994-1-1:2004 (EN-4) e ANSI/ASCE 3 (ANSI, 1991), apresenta dois métodos para avaliação da resistência ao cisalhamento longitudinal: método *m-k* e método da interação parcial. O método *m-k* é válido para lajes mistas dúcteis e frágeis, enquanto o método da interação parcial é válido apenas para lajes mistas dúcteis.

a) Método *m-k*

O objetivo do método *m-k* é determinar a força cortante última (V_u), Eq. (1). Deste modo, são necessárias as seguintes variáveis: V_u força de cisalhamento final; b é a largura da laje mista; d_f é a profundidade efetiva da laje mista; A_f é a área nominal da seção transversal da fôrma de aço e L_s o comprimento do vão de cisalhamento. As constantes m e k são obtidas através de regressão linear dos ensaios experimentais, realizados para dois vãos de cisalhamento, e representam o intertravamento mecânico e o atrito entre o concreto e a fôrma.

$$\frac{V_u}{b \cdot d_f} = \frac{m \cdot A_f}{b \cdot L_s} + k \quad (1)$$

b) Método da interação parcial

O método da interação parcial, Eq. (2) a Eq. (5), é válido para lajes mistas dúcteis e é obtido a partir do equilíbrio das forças horizontais. Nesse método, o momento fletor de

cálculo (M_{Rd}), Eq. 3, é comparado com o momento fletor experimental (M_{Sd}), Eq. 4, e, por último, determina-se a tensão média resistente ao cisalhamento longitudinal média na interface aço-concreto, Eq. 6.

$$\eta = \frac{N_c}{N_{cf}} \quad (3)$$

$$M_{Rd} = N_c \left(h - 0,5 \cdot x_{pl} - e_p + (e_p - e) \cdot \frac{N_c}{A_p \cdot f_{yd}} \right) + M_{pr} \quad (4)$$

$$M_{pr} = 1,25 \cdot M_{pa} \cdot \left(1 - \frac{N_c}{A_p \cdot f_{yd}} \right) \quad (5)$$

$$\tau_u = \frac{\eta \cdot N_{cf}}{b \cdot (L_s + L_o)} \quad (6)$$

Nas Eqs. (3) a (6), N_c é a resultante de compressão no concreto; N_{cf} a força normal de compressão na laje de concreto para admitindo as lajes na condição de interação total; h_t altura total da laje mista; f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto; e_p a distância da linha neutra de plastificação da seção efetiva da fôrma de aço em relação a face inferior; e é a distância do centro geométrico da área efetiva da fôrma de aço em relação a face inferior; N_{pa} é a força de plastificação da fôrma de aço; M_{pa} é o momento de plastificação na forma de aço; L_o é o comprimento da laje em balanço; b é a largura da laje mista; L_s corresponde ao vão de cisalhamento.

3.2.3. Lajes mistas com conector de cisalhamento

3.2.3.1. Comportamento global

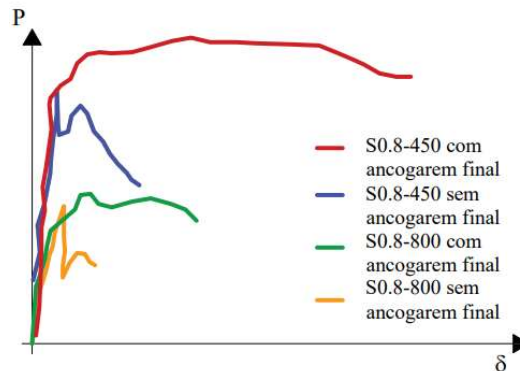
Os conectores de cisalhamento são utilizados para promover a ligação entre a laje de concreto e a viga metálica. Quando a viga mista é produzida a partir da associação da laje mista e do perfil metálico, tem-se o sistema de piso misto.

Estudos presentes na literatura (BAI et al., 2020; LI et al 2017; TAHIR et al., 2019, YI et al., 2020; SHEN et al., 2020; RANA et al., 2015) indicaram que a presença dos conectores de cisalhamento contribui para o aumento da capacidade resistente e a rigidez das lajes mistas. Isso é atribuído ao aumento do grau de conexão da interface aço-concreto promovido pelos conectores (RANA et al., 2019). Desse modo, as lajes mistas com falha por cisalhamento longitudinal e com conectores de cisalhamento podem atingir a conexão total, a depender do número de conectores. Assim, apesar de estarem em interação parcial, as lajes podem suportar

acrécimos de carregamento até que ocorra a plastificação da seção na região de momento fletor máximo.

As lajes mistas com conectores possuem comportamento mais dúctil do que as lajes sem conectores (BAI et al., 2020; LI et al., 2017; CHEN; SHI, 2011; SBEN et al., 2020; NAGY; SZARTMARI, 1998. Desse modo, pode-se concluir que os conectores contribuem para o aumento da resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas de aço e concreto e, por consequência, conduzem ao aumento da capacidade última (BAI et al., 2020; CHEN; SHI, 2011; JEONG et al., 2003; DEGTYAREV et al., 2014). A Figura 3.9 ilustra curvas genéricas, baseadas no trabalho de Bai et al (2020), que comparam os resultados de lajes mistas com e sem conectores de cisalhamento.

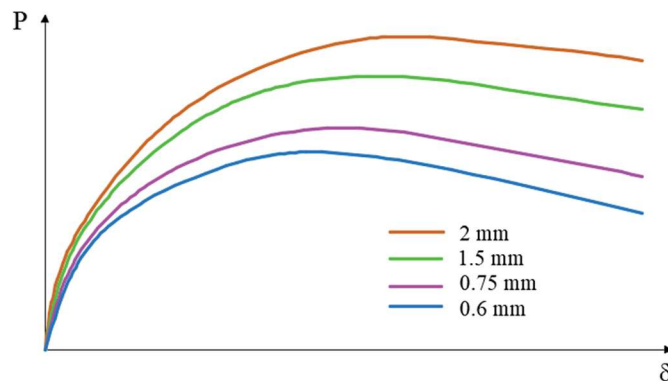
Figura 3.9 - Capacidade de carga das lajes mistas com e sem conectores de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Bai et al (2020).

Os autores Rana et al (2015), avaliaram a influência dos materiais e da espessura da fôrma de aço nas lajes mistas com conectores de cisalhamento. Os autores observaram que a retração e a fluência do concreto teve pouca influência na capacidade última das lajes mistas com conectores de cisalhamento. Por outro lado, o aumento da espessura da fôrma contribuiu significativamente para o aumento da capacidade última das lajes, como indica a Figura 3.10.

Figura 3.10 – Influência da espessura da fôrma nas lajes mistas com conectores.



Fonte: Adaptado de Rana et al (2015).

Diferentes configurações de conectores já foram propostas na literatura. O conector mais utilizado é do tipo pino com cabeça (*stud bolt*), Figura 3.11. A vantagem principal do seu uso é a boa produtividade advinda da rapidez e facilidade de aplicação, uma vez que são soldados diretamente sobre a fôrma metálica. Por outro lado, a resistência da solda pode ser afetada negativamente pelo clima, pelo estado da superfície da fôrma ou pela pintura da fôrma ou viga de aço, devendo ser adequadamente observada.

Figura 3.11 – Laje mista com conector tipo stud.



Fonte: Ahmet et al. (2020).

O conector Perfobond consiste em uma chapa plana de aço com furos circulares que é soldada longitudinalmente ao longo do comprimento da nervura da fôrma, Figura 3.12. Barras de aço transversais aos furos são posicionadas nas lajes de concreto. O confinamento do concreto no interior dos furos, associado às armaduras longitudinais, promovem o aumento da resistência ao cisalhamento da interface aço-concreto (JEONG et al., 2009).

Figura 3.12 – Laje mista com conector de cisalhamento do tipo Perfobond.



Fonte: Jeong et al (2009).

O conector do tipo U, consiste em um pedaço de perfil laminado com uma das mesas soldadas sobre a fôrma. Esse conector pode ser instalado com uma de suas mesas soldadas na fôrma de aço. Apresenta como principal vantagem a promoção do confinamento do concreto em seu interior. Por outro lado, a desvantagem está associada a dificuldade de instalação, o que resulta em baixa produtividade.

3.2.3.2. Modos de falha

As lajes mistas com conectores de cisalhamento podem falhar por: plastificação ou rasgamento da fôrma de aço e pelo esmagamento do concreto em torno dos conectores. Além desses, mais raramente, pode haver plastificação dos conectores de cisalhamento ou ruptura do cordão de solda.

A falha por esmagamento do concreto ocorre quando a tensão admissível do concreto na região dos conectores é ultrapassada. Como resultado, obtém-se redução da capacidade última das lajes mistas e esmagamento localizado do concreto, como ilustrado por Rana et al (2015) na Figura 3.13 (a). A falha por rasgamento da fôrma de aço, Figura 3.13 (b), é evidenciada pelo rasgamento da fôrma na região em torno do conector. Por outro lado, a falha por plastificação da fôrma pode ocorrer no entorno dos conectores ou na região de momento máximo.

Como o estudo paramétrico foi conduzido com conectores do tipo pino com cabeça (*stud bolt*), os modos de falha descritos em sequência foram observados em lajes mistas com esse tipo de conector.

Figura 3.13 – Esmagamento do concreto.



a) Esmagamento do concreto.



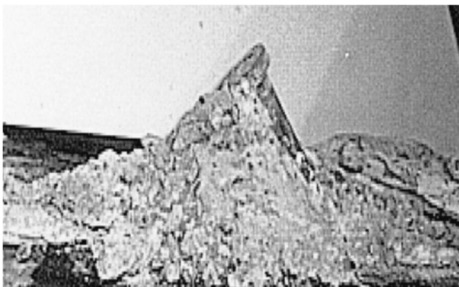
b) Rasgamento da fôrma de aço.

Fonte: Rana et al (2015).

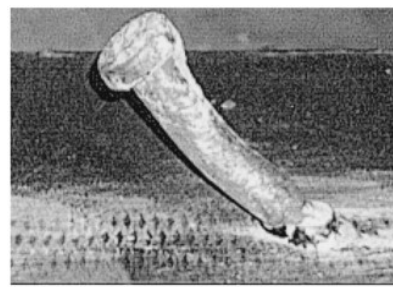
Nas lajes mistas com conectores do tipo pino com cabeça, foram observados os seguintes modos de falha: ruptura do cone de concreto, plastificação do conector e falha combinada do conector e do concreto. A ruptura do cone de concreto é caracterizada pelo esmagamento do concreto ao redor do pino e geralmente ocorre antes da falha no conector (ASCE; EL-LOBODY, 2005). A ruptura por compressão progride através da espessura da laje de concreto, assumindo uma forma cônica ao redor do pino (ASCE; EL-LOBODY, 2005), Figura 3.14 (a).

A falha por escoamento do conector é observada nas situações em que as tensões solicitantes superam a tensão de escoamento do material, e, em algumas situações, pode ocorrer antes que a resistência do concreto à compressão seja alcançada (ASCE; EL-LOBODY, 2005), Figura 3.14 (b). Por outro lado, a falha combinada acontece quando as tensões máximas são atingidas no conector e no concreto simultaneamente (ASCE; EL-LOBODY, 2005).

Figura 3.14 – Falha por ruptura do cone de concreto.



a) Falha por ruptura do cone concreto.



b) Falha por escoamento do conector.

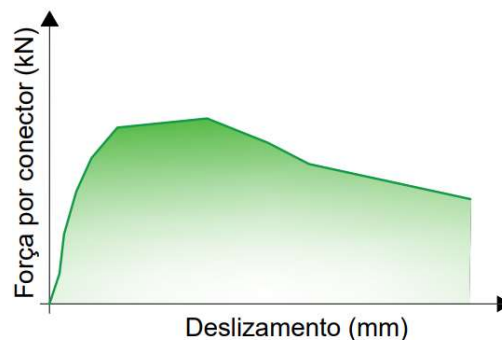
Fonte: M. Asce e El-Lobody (2005).

3.2.3.3. Comportamento da interface aço-concreto

O comportamento misto nas lajes de aço e concreto é desenvolvido a partir de mecanismos presentes na interface aço-concreto que permitam a transferência de esforços longitudinais entre os dois materiais. Para isso, pode-se utilizar mecanismos químicos (aderência), mecânicos (mossas e conectores) e físicos (rugosidade superficial dos materiais).

No contexto da ligação mecânica, os conectores de cisalhamento e as mossas contribuem para a resistência ao cisalhamento longitudinal após a ruptura da adesão. Com o início do deslizamento relativo, os conectores e as mossas serão mobilizados, contribuindo para a restrição ao livre deslizamento relativo. A partir de um certo nível de carga, a resistência promovida pelas mossas diminui gradualmente a medida em que a fôrma se deforma e, no estágio final, a resistência ao cisalhamento longitudinal é promovida apenas pelos conectores de cisalhamento. Tahir et al (2009) ilustra, Figura 3.15, a contribuição dos conectores nas lajes mistas.

Figura 3.15 – Conectores de cisalhamento no comportamento da interface aço-concreto.



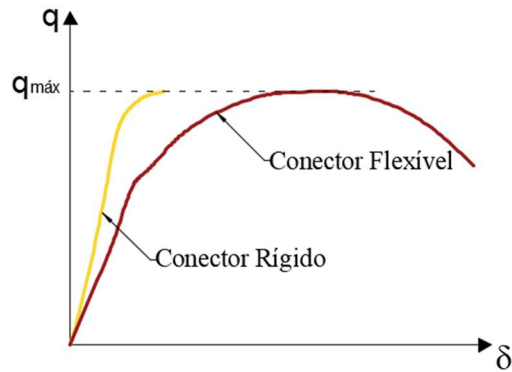
Fonte: Adaptado de Tahir et al (2009).

O comportamento da interface aço-concreto é comumente avaliado a partir de ensaios de cisalhamento direto. Autores como Daniels e Crisinel (1993) propuseram que o comportamento da interface das lajes mistas com conectores de cisalhamento fosse avaliado a partir de ensaios *push-off*. Além dessa, outras configurações também foram propostas na literatura.

A partir do ensaio tipo *push-off* foi observado que os conectores podem ser classificados como flexíveis e rígidos. Os conectores flexíveis possuem menor rigidez inicial e maior ductilidade do que os conectores do tipo dúctil, como mostrado na curva força por deslizamento ilustrada na Figura 3.16, (DAVID, 2007). A classificação entre dúctil e frágil

independe da rigidez inicial do conector, para tal classificação, segundo a norma EN-4, os conectores podem ser classificados como dúcteis caso o valor característico do deslizamento último seja superior a 6 mm.

Figura 3.16 – Conector rígido x conector flexível



Fonte: Adaptado de David (2007).

Daniels e Crisinel (1993) avaliaram o comportamento da interface aço-concreto contendo conectores do tipo *stud bolt* e conector tipo C. Os modos de falha apresentados pelas lajes com conectores tipo C e Stud Bolt foram parecidos, sendo por: flexão lateral do conector e rasgamento da fôrma próximo à base dos conectores.

Com relação à distribuição das deformações, estudos mostraram que as deformações na região dos conectores foram maiores nas lajes com conectores do tipo *stud bolt* do que nas lajes com conectores do tipo C. Segundo, Daniels e Crisinel (1993) isso deve-se a maior largura dos conectores tipo C, o que faz com que as deformações próximas a região dos conectores sejam minimizadas.

Jeong et al (2009) realizaram ensaios do tipo push-off em lajes mistas com conectores do tipo Perfobond. Os resultados mostraram boa correlação entre a resistência ao cisalhamento longitudinal obtida dos ensaios de cisalhamento direto e de flexão a quatro pontos para lajes com vãos longos. À medida que o comprimento do vão de cisalhamento diminuiu, observou-se que a capacidade última das lajes mistas foi superestimada, o que foi atribuído ao aumento da resultante da força de atrito entre a fôrma e a laje de concreto.

3.2.3.4. Avaliação da resistência

O método m-k e o método da interação parcial, apresentados no item 3.2.2, também podem ser utilizados para lajes mistas com conectores de cisalhamento. Para tal, os parâmetros de interface devem ser ajustados a partir de ensaios de lajes com conectores.

Nesse caso, os resultados obtidos pela reta m-k e tensão cisalhante média só serão válidos para a quantidade e disposição dos conectores utilizados na interface aço-concreto.

Caso não seja possível a realização de ensaios de lajes com conectores, pode-se utilizar a aproximação descrita na BS5950-Part4 e utilizada por Bai et al (2020). Segundo os autores, a contribuição dos conectores pode ser considerada como o menor valor entre a resistência ao cisalhamento do conector e a resistência ao rasgamento da fôrma de aço ($P_{pb,Rd}$).

A resistência ao rasgo da fôrma pode ser obtida por meio das equações Eq. 7 e Eq. 8, onde: d_{do} é o diâmetro do colar de solda (1.1 vezes o diâmetro do conector); a é a distância entre o centro do conector e final da fôrma de aço, não podendo ser menor que $1.5d_{do}$; t é a espessura da fôrma de aço e f_y tensão de escoamento da fôrma de aço.

$$P_{pb,Rd} = k_{\varphi} d_{do} t f_y \quad (7)$$

$$k_{\varphi} = 1 + \frac{a}{d_{do}} \leq 6 \quad (8)$$

Após a determinação da resistência de cálculo do conector de cisalhamento, a norma BS5950-Part4 apresenta uma formulação, Eq. 9 e Eq.10, para determinar a resistência ao cisalhamento longitudinal de uma laje mista com conectores (V_{us}).

$$V_{us} = V_u + 0.5V_a \quad (9)$$

$$V_a = nN_v^c(d_p - x/2)/L_s \quad (10)$$

onde V_u é a resistência ao cisalhamento longitudinal da laje mista sem conector de cisalhamento; V_a é a resistência ao cisalhamento longitudinal dos conectores de cisalhamento; N_v^c é a resistência de projeto de um conector, que pode ser calculada a partir da Eq.7; n é o número de conectores; d_p é a distância da zona de compressão até o centroide da fôrma; x profundidade da zona de compressão no concreto e L_s comprimento do vão de cisalhamento.

3.2.3.5. Estudos numéricos de lajes mistas com conectores

A modelagem numérica consiste no desenvolvimento de modelos numéricos capazes de simular o comportamento observado experimentalmente e que apresentem boa eficiência computacional. Para tal, é importante que o modelo constitutivo dos materiais, as

características da malha dos elementos, restrições (apoios, carregamento e simetria) e o comportamento da interface de contato entre os materiais sejam adequadamente reproduzidos.

Na literatura, foram propostos modelos numéricos de lajes mistas com conectores de cisalhamento (RANA et al., 2015; LACKI et al., 2019; BAI et al., 2020), os quais foram comparados apenas aos resultados experimentais obtidos por seus próprios autores, o que pode não ser representativo. Além disso, poucos são os estudos que realizaram o estudo paramétrico de lajes mistas com conectores. Na Tabela 4.1 são resumidos os estudos que desenvolveram modelos numéricos de lajes mistas de aço e concreto com conectores de cisalhamento.

Tabela 3.1 – Resumo das características de modelos numéricos importantes para este trabalho de pesquisa.

Artigo	Componente	Malha	Modelo Constitutivo	Interface
John et al (2023)	Concreto ECC	C3D8R	Modelo de Baskar et al.	-Fôrma-concreto: elementos de mola tipo Radial-thrust; -Conector - fôrma: Tie; -Conector-Concreto: Atrito.
	Fôrma de aço	S4R	Elasto-plástico perfeito	
	Conector	C3D8R	Elasto-plástico	
	Malha de aço	T3D2	Elasto-plástico	
Langarudi e Ebrahimnejad (2020)	Concreto	C3D8R	CDP	-Fôrma-viga de aço foi definido como contato sem atrito;
	Viga de aço	C3D8R	Relação tensão - deformação bilinear	
	Fôrma de aço	S4R	Relação tensão - deformação bilinear	-Conector - Fôrma: Atrito + Hard Contact;
	Conectores de cisalhamento	C3D8R	Relação tensão - deformação bilinear	-Malha de aço-concreto: Embedded;
	Barras de aço	T3D2	Relação tensão - deformação bilinear	
	Bai et al (2020)	Concreto ECC	C3D8R	Modelo proposto por Meng et al
Fôrma de aço		S4R	Elasto-plástico	- Barras de aço - concreto: Embedded;
Conector de cisalhamento		C3D8R	Elasto-plástico	- Conector - Fôrma: surface to surface do tipo Hard Contact (coef. de atrito de 0.25)
Barras de aço		T3D2	-	
Lacki et al (2019)	Concreto	Elemento sólido de 27 nós	Modelo uniaxial SIGMAC	-Na interface entre a fôrma de aço e a laje de concreto foi utilizado uma superfície de contato do tipo cola, sem permitir a separação entre os materiais.
	Viga de aço	Elemento sólido de 27 nós	Plástico bi linear	
	Conector	Elemento sólido de 27 nós	Plástico bi linear	
	Malha de aço	Elemento de treliça	Elástico linear	
Rana et al (2015)	Concreto	C3D8R	CDP	-Fôrma-concreto: elementos de mola tipo Radial-thrust;
	Conector	C3D8R	Elasto-plástico perfeito	
	Viga de aço	C3D8R	-	-Viga-Fôrma: Atrito
	Fôrma de aço	S4R	Elasto-plástico perfeito	-Conector - concreto: atrito;
	Malha de aço	T3D2	Elasto-plástico perfeito	-Conector - viga: Tie; - Malha - concreto: Embedded.

De modo geral, observa-se que nas modelagens presentes na literatura realizadas no software Abaqus, geralmente, a fôrma de aço é definida como elemento de casca em integração reduzida (S4R) e a laje de concreto e o conector de cisalhamento como elementos sólidos em integração reduzida (C3D8R). As interações de contato entre conector-concreto e conector-fôrma podem ser do tipo *tie*, no qual os nós vinculados possuem o mesmo comportamento na translação e na rotação, modelo com atrito e/ou *hard contact*. No *hard contact* a penetração de uma superfície na outra é minimizada.

O processamento de lajes mistas com conectores de cisalhamento é mais oneroso (maior tempo de processamento), por isso, usar elementos que facilite e diminua o custo computacional se faz extremamente necessário. Por esse motivo, soluções envolvendo elementos com integração reduzida e/ou a utilização de condições de simetria, são comumente adotadas nos modelos numéricos.

A modelagem numérica é geralmente utilizada em estudos paramétricos. Rana et al (2015), por exemplo, após calibração do modelo numérico, conduziu uma análise paramétrica para investigar a influência da resistência à compressão do concreto, da resistência ao escoamento do conector e da espessura da fôrma de aço no comportamento das lajes mistas com conectores. Dentre os resultados, destaca-se a grande influência do aumento da espessura da fôrma na capacidade resistente do elemento estrutural.

Bai et al. (2020) propuseram um modelo numérico para avaliar a resistência ao cisalhamento longitudinal de lajes mistas com ECC. Os autores observaram que as características definidas no modelo numérico tiveram bons resultados quando comparadas aos estudos experimentais, sendo capazes de reproduzir com precisão o modo de falha e a capacidade última exibida pelos protótipos experimentais.

3.3. Modelo numérico

3.3.1. Geometria dos modelos com conectores de cisalhamento

Os modelos numéricos de lajes mistas com conectores utilizados no estudo paramétrico foram desenvolvidos no software ABAQUS, o qual utiliza o método dos elementos finitos para solução das equações de compatibilidade nodais. No estudo foi investigado lajes com fôrmas de perfil trapezoidal e perfil reentrante e com conectores do tipo pino com cabeça.

Para validação da estratégia de modelagem, foram escolhidas 4 lajes mistas com conectores e com diferentes esbeltezes, duas ensaiadas por Bai et al (2020) e duas ensaiadas por Li et al (2017), conforme descrição apresentada na Tabela 3.2. As lajes de Bai et al (2020) foram produzidas com fôrmas com perfil trapezoidal e concreto *Engineered Cementitious Composite* (ECC). Nas lajes de Li et al (2017) foram utilizadas fôrmas com perfil reentrante e concreto de agregado leve (*Lightweight Aggregate Concrete* – LWAC). As propriedades mecânicas da fôrma, da laje de concreto e dos conectores de cisalhamento das lajes modeladas estão resumidas na Tabela 3.3.

A nomenclatura utilizada na identificação das lajes é inicialmente representada pela letra B para as lajes testadas por Bai et al (2020) e L par as lajes ensaiadas por Li et al (2017), seguida a altura da laje e do comprimento do vão de cisalhamento.

Tabela 3.2 – Geometria das lajes ensaiadas por Bai e Li et al.

Autor	ID	Dimensões da laje mista				Conector		
		L (mm)	h (mm)	t (mm)	b (mm)	Ls (mm)	hc (mm)	D (mm)
Bai et al (2020)	B150/450	1800	150	0.8	688	450	100	16
	B150/800	3200	150	0.8	688	800	100	16
Li et al (2017)	L147/500	2200	147	1.2	720	500	100	16
	L148/900	3800	148	1.2	720	900	100	16

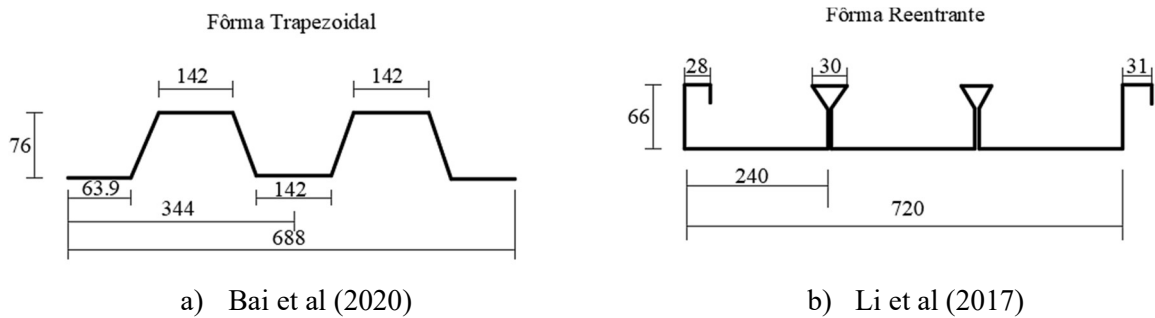
Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizadas para calibração do modelo numérico.

Autor	Concreto	ID	fc (MPa)	Ec (GPa)	Fy (MPa)	Es (GPa)	fyc (MPa)	Esc (GPa)
Bai et al (2020)	ECC	B150/450	36.56	18.1	308.74	227	340.7	207
		B150/800	36.56	18.1	308.74	227	340.7	207
Li et al (2017)	LWAC	L147/500	34.96	26.3	232	180	340.7	207
		L148/900	34.96	26.3	232	180	340.7	207

Nas Tabelas 3.2 e 3.3 os parâmetros geométricos destacados e a simbologia adotada representa: (L) comprimento da laje mista; (h) a altura da laje de concreto; (t) a espessura da fôrma de aço; (b) largura da laje mista; (hc) altura do conector e D diâmetro do conector. Nos parâmetros mecânicos, tem-se: (fc) resistência à compressão do concreto; (Ec) módulo de elasticidade do concreto; (fy) módulo de elasticidade da fôrma de aço; (Es) módulo de elasticidade do aço; (fyc) módulo de elasticidade do conector e (Esc) módulo de elasticidade do conector.

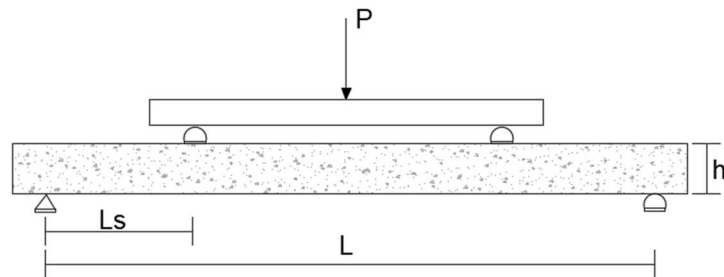
Na Figura 3.17 são ilustrados os perfis das fôrmas dos protótipos de Li et al (2017) e Bai et al (2020) e na Figura 3.18 é ilustrado o esquema do ensaio de flexão a 4 pontos utilizado pelos autores.

Figura 3.17 – Perfis geométrico das formas das lajes utilizadas na validação.



Fonte: Adaptada de Bai et al (2020) e Li et al (2017).

Figura 3.18 – Ensaio de flexão a quatro pontos.



Fonte: O autor.

As lajes ensaiadas por Bai et al (2020) possuem uma malha eletrosoldada com barras de diâmetro 6mm, posicionada no topo da laje de concreto para impedir efeitos de fluência e retração na laje de concreto. Para fins de calibração do modelo, essa malha também foi incluída no modelo numérico. Nas lajes testadas por Li et al (2017) não foi utilizada a malha eletrosoldada.

Os parâmetros de caracterização das propriedades dos elementos que compõe o modelo numérico (caracterização dos materiais, tipo e tamanho de malha, interface e condições de contorno) são de importante definição, pois, o modelo computacional deve ser capaz de simular com precisão o que ocorre nos estudos experimentais. Em sequência são apresentados os parâmetros utilizados na definição do modelo numérico.

3.3.2. Comportamento mecânico dos materiais

A fôrma de aço foi admitida com comportamento elasto-plástico perfeito. O coeficiente de Poisson foi admitido como 0.3. A laje de concreto foi modelada a partir do modelo *Concrete Damage Plasticity (CDP)*, o qual é comumente utilizado na modelagem de elementos de concreto devido à possibilidade de simular a degradação do material a partir de curvas de dano.

No modelo do CDP deve-se descrever o comportamento mecânico à tração e à compressão do material. Nos modelos numéricos, o comportamento mecânico foi descrito a partir da curva tensão vs deformação do material. O comportamento à compressão foi descrito a partir de uma curva de dois trechos, um elástico (até 30% da tensão máxima), seguida de um trecho inelástico, Figura 3.19. O trecho inelástico foi baseado na formulação proposta por Guo (2014) dado pelas equações (11), (12) e (13), em que x corresponde a relação entre a deformação em cada ponto e a deformação de pico.

$$\sigma_c = f_{bm}[\alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3] \quad x \leq 1 \quad (11)$$

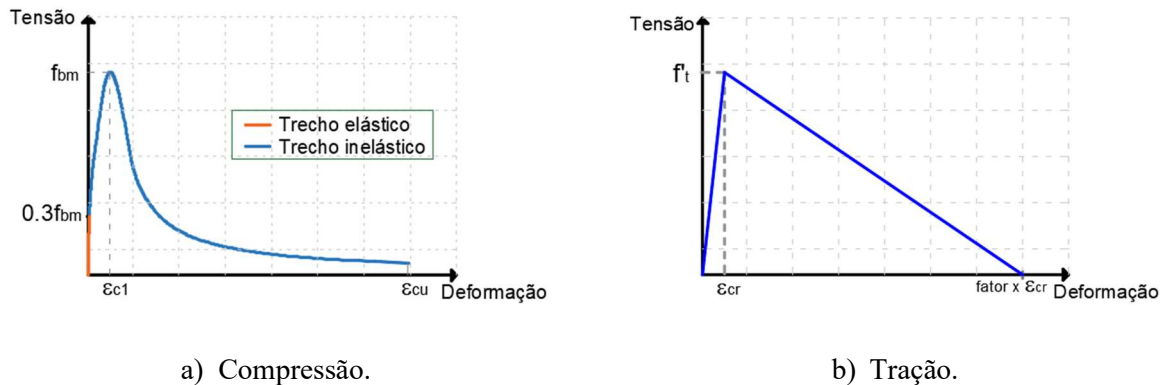
$$\sigma_c = \frac{f_{bm}x}{\alpha_d(x - 1)^2 + x} \quad x > 1 \quad (12)$$

$$\alpha_a = \frac{E_{cm}}{E_{c1}} \quad (13)$$

sendo: f_{bm} a tensão de pico à compressão do concreto; E_{cm} é o módulo de elasticidade inicial (para uma tensão igual a $0,3f_{bm}$); E_{c1} o módulo de elasticidade para a tensão máxima; α_a e α_d são os parâmetros relacionados aos ramos ascendentes e descendentes da curva, respectivamente. O parâmetro α_d deve ser ajustado em função do comportamento do material, após a tensão de pico e varia de 0 a 4.

Para o comportamento do concreto à tração, admitiu-se o modelo proposto por Bathe et al (1989), Figura 3.19 (b), no qual admite-se o comportamento linear antes e após o pico. A deformação de pico ($\epsilon_{cr} = f_t/E_c$) é da ordem de 10^{-4} . Após o pico, a tensão é reduzida gradualmente a zero para uma deformação total que é resultado da multiplicação de um amplificador vezes a tensão de pico (HOSSAIN et al., 2019). Para a obtenção do fator de amplificação, foi conduzida uma análise paramétrica nas lajes com concreto ECC e com concreto LWAC, sendo utilizados valores de 70, 80, 90 e 100 vezes a deformação de pico. Após o estudo, constatou-se que os fatores de 70 e 100 para as lajes ECC e LWAC, respectivamente, conduziram a resultados mais próximos ao experimental.

Figura 3.19 – Curva do concreto à compressão e à tração.



Fonte: O autor.

Os parâmetros da superfície de falha do modelo do CDP, Tabela 3.4, foram calibrados conforme o tipo de material e com base em recomendações apresentadas por outros autores presentes na literatura (LIU et al., 2022; WANG et al., 2022; WU et al., 2021; HOSSAIN et al., 2019; KHAN et al., 2020; MENG et al., 2017; LIU et al., 2020; KOH et al., 2009). Os parâmetros que foram definidos correspondem ao ângulo de dilatância (ψ), excentricidade, razão entre as tensões de escoamento compressivas biaxiais e uniaxiais (f_{bo}/f_{co}), razão entre o segundo invariante de tensão no meridiano de tração e de compressão (K), e o parâmetro de viscosidade (μ).

Tabela 3.4 – Propriedades do CDP

Lajes	ψ	Excentricidade	f_{bo}/f_{co}	K	μ
Bai et al (2020)	35	1.16	1.16	0.667	1.00E-06
Li et al (2017)	25	0.1	1.16	0.667	1.00E-06

3.3.3. Geometria e condições de contorno

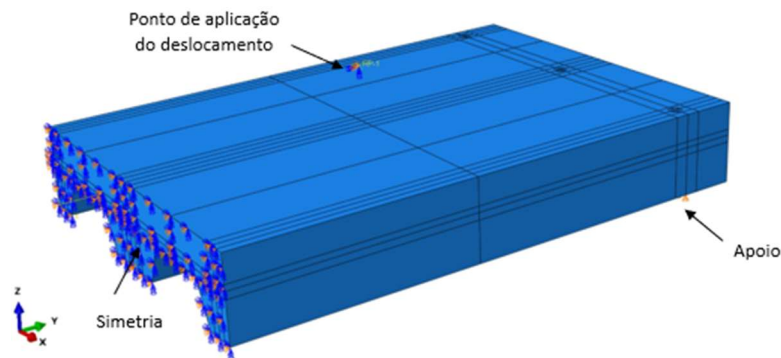
As lajes mistas foram modeladas como elementos isolados, os quais foram unidos a partir de interações de contato. Quatro partes foram criadas para composição das lajes mistas: laje de concreto, fôrma de aço, malha de aço e conectores de cisalhamento do tipo *stud bolt*. Na Figura 3.20 está ilustrada a montagem dos modelos. Devido as condições de contorno do problema, foi admitido apenas simetria transversal das lajes.

As condições de contorno são divididas em: condições de carregamento, simetria e apoios. O carregamento foi aplicado através de um deslocamento prescrito a um ponto criado a uma altura de 100mm acima da laje de concreto. Esse ponto foi definido como ponto de referência (RP) e conectado a duas linhas de nós no topo da laje de concreto a partir do

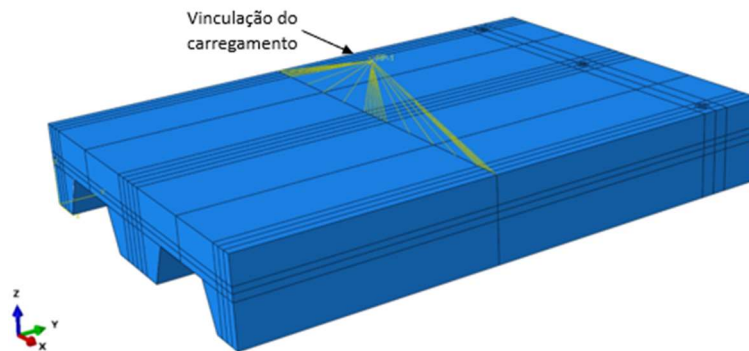
Constrain do tipo *Coupling*, do subtipo *Kinematic*. O RP foi impedido de deslocar nas direções X e Y e de girar em Y e Z e a ele foi atribuído um deslocamento na direção Z.

Apenas a metade da laje mista foi modelada e, por isso, utilizou-se de condição de simetria na região central da laje. Essa técnica foi utilizada no intuito de diminuir o tempo de processamento sem prejudicar os resultados numéricos. A laje mista é biapoiada e para tal definiu-se apoios na face inferior da fôrma de aço, restringindo o deslocamento em duas linhas de nós. Tais condições de contorno foram impostas de modo análogo nas lajes com fôrmas trapezoidais e reentrantes, e estão exemplificadas Figura 3.20 na laje mista com fôrma trapezoidal.

Figura 3.20 – Condições de contorno.



a) Apoio e simetria.



b) Deslocamento prescrito

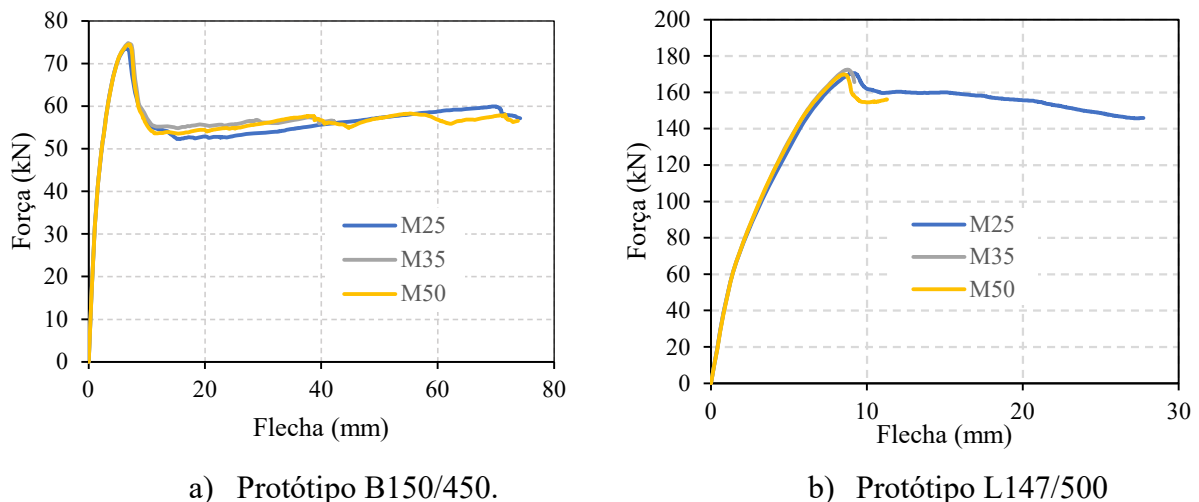
Fonte: O autor.

3.3.4. Malha dos modelos numéricos

Na calibração do modelo numérico das lajes propostas por Bai et al (2020) e Li et al (2017) sem conectores de cisalhamento foi investigado o tamanho da malha e o tipo da malha.

Desse modo, foi realizado o teste para três tamanhos de malha diferentes (25, 35 e 50 mm) com elementos em integração completa e em integração reduzida e foi observado que o tamanho de 25mm para os elementos (fôrma, laje de concreto e malha) apresentava melhores resultados em termos de comportamento e tempo de processamento. Também foi realizado um estudo de malha do conector para três tamanhos diferentes (25,35 e 50 mm). Dos resultados, foi observado que combinação dos elementos em integração reduzida e dimensão de 25mm forneceu melhor custo-benefício em termos de resposta numérica e tempo de processamento. O estudo de malha para os protótipos B150/450 e L147/500 está ilustrado na Figura 3.21.

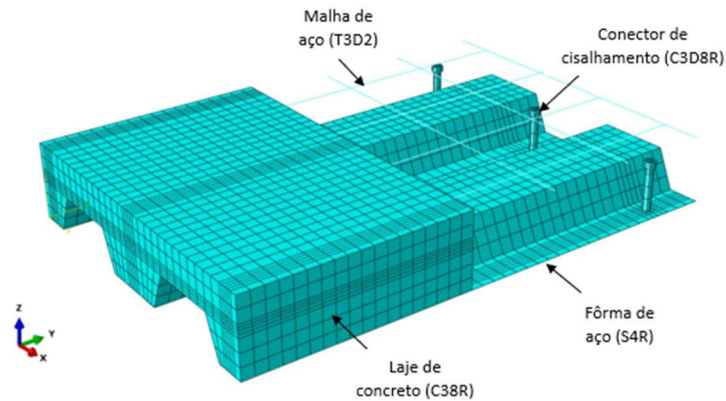
Figura 3.21 – Estudo de malha do conector.



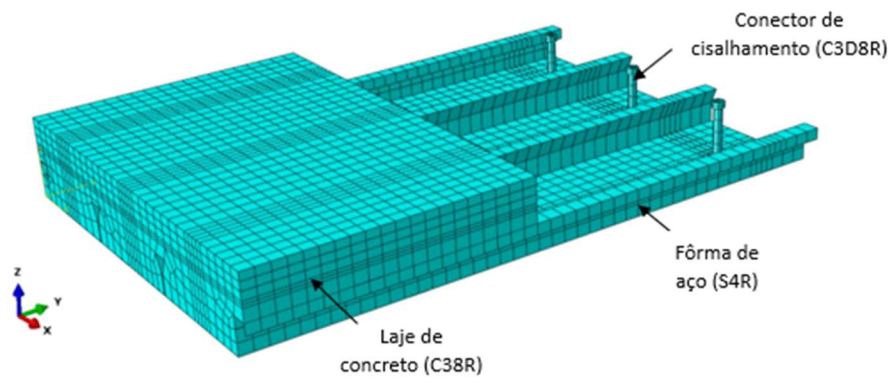
Fonte: O autor.

A laje de concreto e os conectores de cisalhamento foram discretizados como elementos sólidos hexaédricos lineares de oito nós com integração reduzida (C3D8R). A fôrma de aço foi modelada como elemento de casca e discretizada a partir de elementos de casca de quatro nós com integração reduzida (S4R). A malha eletrossoldada, presente na laje de Bai et al (2020), foi modelada como elemento de treliça e discretizada com elemento finito de treliça de dois nós (T3D2). A Figura 3.22 ilustra o tipo de malha adotada para as lajes trapezoidais e reentrantes.

Figura 3.22 – Tipo de malha.



a) Laje mista com fôrma trapezoidal.



b) Laje mista com fôrma reentrante.

Fonte: O autor.

3.3.5. Interações

O comportamento tangencial entre a fôrma de aço e a laje de concreto foi definida como uma superfície coesiva com lei tração separação. Esse comportamento se baseia em rigidez normal e de cisalhamento desacopladas (K_{nn} , K_{ss} , K_{tt}). Os parâmetros utilizados foram definidos a partir das lajes sem conectores e estão apresentados na Tabela 3.5. Inicialmente, o comportamento da interface é elástico linear e, após início e evolução do dano, há um ramo descendente que caracteriza a degradação da interface aço-concreto. O ramo descendente foi simulado a partir do modelo *Maximum nominal stress*, no qual a evolução do dano foi admitida a partir do módulo *Displacement*.

Tabela 3.5 – Propriedades da superfície coesiva.

Lajes	Knn	kss	Ktt
Bai et al (2020)	2	0.02	0.02
Li et al (2017)	10	0.8	0.8

Atrelado ao comportamento tangencial, foi definido uma interação normal para que não houvesse nenhuma penetração entre a fôrma de aço e a laje de concreto. Esse contato normal é do tipo *Hard Contact*.

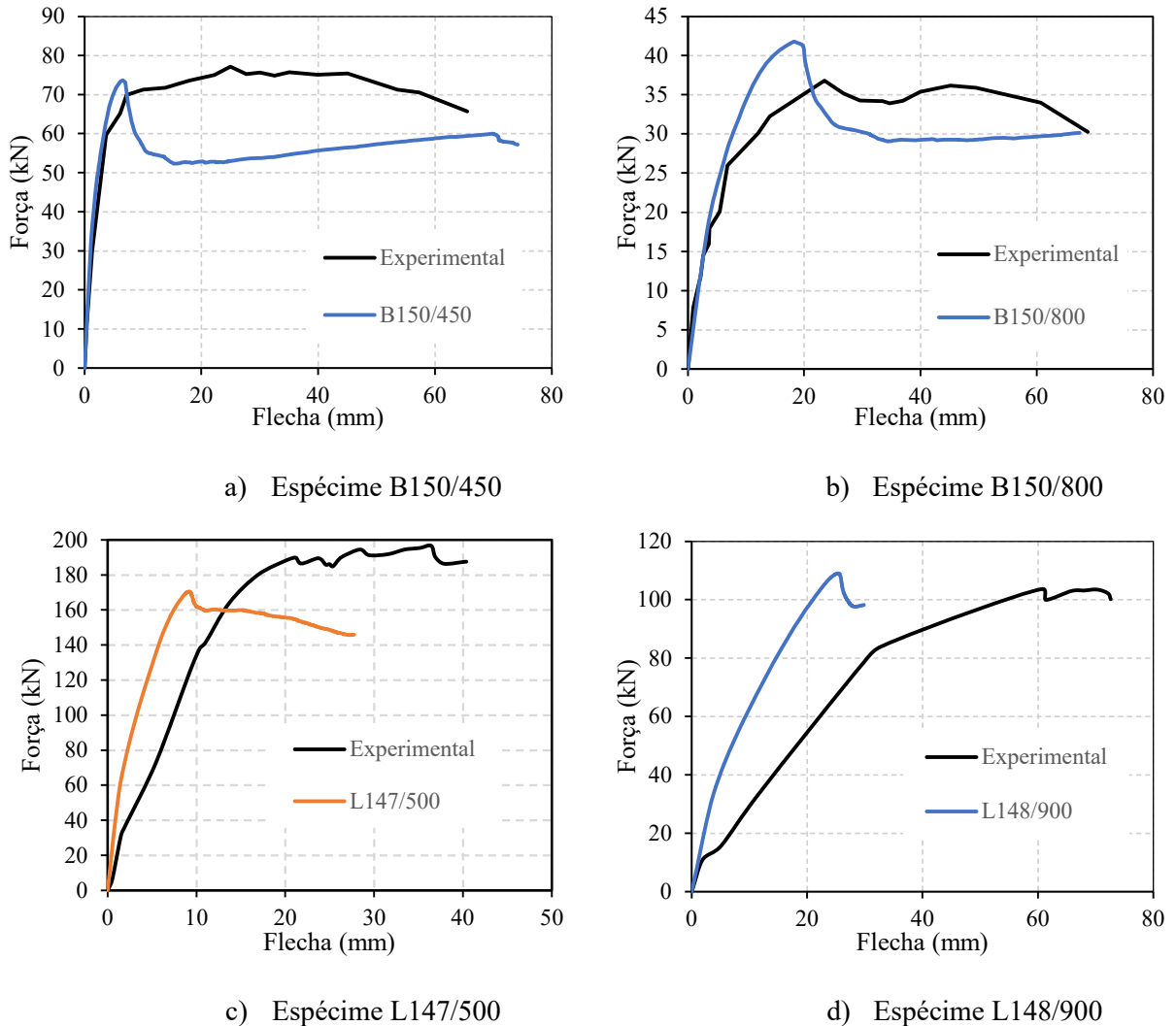
As lajes trapezoidais possuem uma malha de aço posicionadas na capa de concreto, portanto, para o contato entre a malha de aço e a laje de concreto foi utilizado o módulo *Constrain* do tipo *Embedded*. Esse tipo interação promove a vinculação dos nós e um elemento estrutural com o outro, o resulta em uma conexão rígida entre os materiais.

Os conectores de cisalhamento foram vinculados as fôrmas de aço com o *Constrain* do tipo *Tie*. O contato tangencial entre o conector e a laje de concreto foi testado utilizando as propriedades de atrito, contudo não apresentou resultados relevantes no comportamento global e local das lajes mistas e, por isso, optou-se por não o utilizá-lo. A propriedade normal de contato foi definida do tipo *Hard Contact* foi utilizada entre o conector de cisalhamento e a laje de concreto.

3.3.6. Validação dos modelos numéricos

A interface aço-concreto foi calibrada a partir do modelo das lajes sem conectores, sendo, portanto, necessários ajustes apenas no contato entre o conector e a laje de concreto e o conector e a fôrma de aço. Desse modo, os modelos numéricos definitivos das lajes mistas com conectores de cisalhamento foram calibrados e apresentaram bom comportamento mecânico quando comparado aos resultados experimentais obtidos por Bai et al (2020) e Li et al (2017). Por isso, é possível concluir que as estratégias adotadas para caracterização das propriedades mecânicas e de malha do material, além dos parâmetros de interface, se mostram adequadas. Na Figura 3.23 são comparados os resultados numéricos e experimentais e na Tabela 3.6 são comparados os valores de carga dos protótipos estudados.

Figura 3.23 – Comparação da curva força-flecha do modelo numérico com o modelo experimental das lajes mistas com conector de cisalhamento.



Fonte: O autor.

Das curvas Força vs Flecha nota-se que a carga última numérica e experimental são próximas. Observa-se ainda que nas lajes de Bai et al (2020) foi possível simular com certa precisão o comportamento elástico linear da laje mista. Enquanto nas lajes de Li et al (2017), a rigidez do modelo numérico se mostrou maior que a do protótipo experimental e, por isso, a capacidade última do modelo numérico ocorre para uma flecha inferior ao do resultado experimental.

Bai et al (2020) observou que os protótipos referentes aos modelos numéricos propostos apresentaram falha dúctil. O autor apresenta como a referência a Figura 3.24 (a) e destaca que há o esgotamento da mesa inferior da fôrma de aço quando a carga última é alcançada. Os modelos numéricos (B150/450 E B150/800) foram capazes de simular o

descrito por Bai et al (2020), como mostra a Figura 3.24 (b) e (c) exemplificada pelo protótipo B150/450.

Tabela 3.6 – Valores numéricos e experimentais do modelo numérico definitivo.

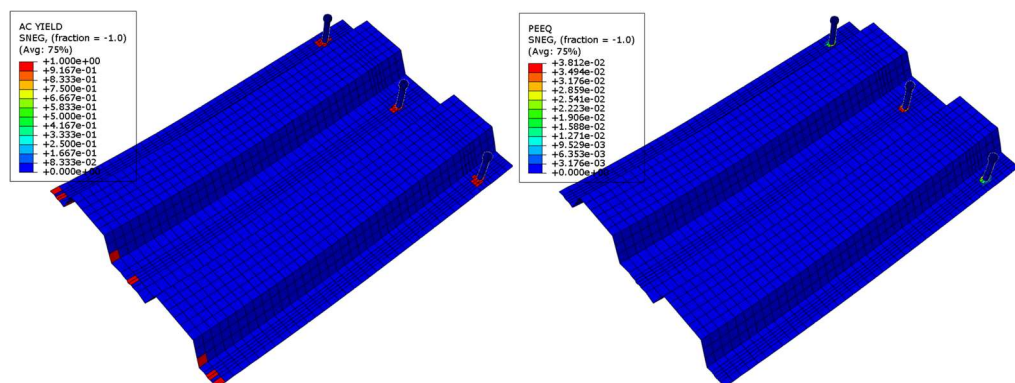
ID	Experimental	Numérico	Erro (%)
B150/450	77.16	73.65	4.55
B150/800	36.71	41.79	13.84
L147/500	196.72	173.38	11.86
L148/900	103.71	7.32	7.05

Fonte: O autor.

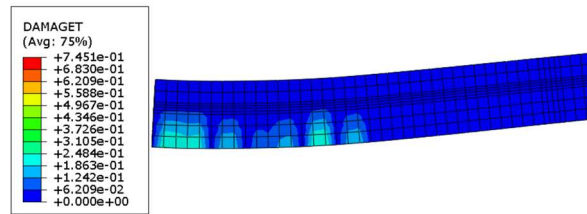
Figura 3.24 – Modelo experimental e modelo numérico calibrado – Espécime B150/450.



a) Experimental



b) Escoamento e deformações plásticas na fôrma na região do conector.



c) Fissuração na laje de concreto.

Fonte: a) Bai et al (2020); b) e c) O autor.

Na Figura 3.24 (b) são ilustradas as regiões de escoamento da fôrma e da laje de concreto na carga última alcançada pelos modelos numéricos. Assim como nos protótipos experimentais, foi observado o escoamento da fôrma de aço nos pontos de aplicação de carga e na região em torno dos conectores de cisalhamento. Além disso, a Figura 3.24 (c) mostra que o modelo foi capaz de simular a fissuração da laje de concreto, principalmente na região de aplicação de carga.

Os autores Li et al (2017) não apresentaram imagens das lajes mistas após o ensaio de flexão a quatro pontos. Contudo, os autores destacam que a falha ocorre por falha a flexão, que resultou na plastificação dos materiais. O mesmo pode ser observado nos modelos numéricos em que, por exemplo, no modelo L147/500 o momento de plastificação da fôrma de aço (35.7 kN.m) é inferior ao momento alcançado no modelo numérico é de (37.3 kN.m).

Os resultados dos modelos numéricos mostram que os parâmetros definidos para a modelagem numérica bons resultados, tanto em termos de capacidade última, quanto em termos de comportamentos local e global, quando comparados aos ensaios experimentais.

3.4. Estudo paramétrico

O estudo paramétrico foi conduzido a fim de avaliar a influência de diferentes parâmetros no comportamento global e local das lajes mistas de aço e concreto com conector de cisalhamento. Os parâmetros avaliados são: comprimento do vão de cisalhamento (L_s), altura do conector (h_c) e altura da laje de concreto (h), diâmetro do conector (D) e espessura da fôrma (t), resistência à compressão do concreto (f_c) e módulo de elasticidade do concreto (E_c), e a quantidade de conectores de cisalhamento. A Tabela 3.7 e a Tabela 3.8 destacam os parâmetros que foram avaliados e as propriedades geométricas e mecânicas utilizadas em cada protótipo. Foram avaliados dois grupos de lajes, o primeiro de lajes trapezoidais e o segundo de lajes reentrantes. A título de simplificação, as lajes foram avaliadas com o mesmo comprimento efetivo de 1800mm.

Os protótipos trapezoidais foram nomeados da forma T-RR/SS/TT/UU/VV/WW/XX/YY/ZZ. No local da letra R é indicado a altura da laje de concreto; a letra S indica a espessura da fôrma de aço; T o comprimento do vão de cisalhamento; U é a altura do conector de cisalhamento; V o diâmetro do conector de cisalhamento; W é a resistência a compressão do concreto; Y é o módulo de elasticidade do concreto e Z é a quantidade de conectores na banzo inferior central da fôrma de aço. Os protótipos reentrantes seguiram a mesma nomenclatura, mas iniciados pela letra R. Estão indicados em azul, nas Tabelas 3.7 e 3.8 os parâmetros que estão sendo variados em cada item.

Tabela 3.7 – Análise paramétrica das lajes trapezoidais.

Parâmetro	ID	L (mm)	h (mm)	t (mm)	b (mm)	Ls (mm)	hc (mm)	D (mm)	fc (MPa)	Ec (GPa)
Vão de cisalhamento (Ls)	T-150/0.8/300/100/16/36.6/18.1/1	1800	150	0.8	688	300	100	16	36.6	18.1
	T-150/0.8/600/100/16/36.6/18.1/1	1800	150	0.8	688	600	100	16	36.6	18.1
	T-150/0.8/800/100/16/36.6/18.1/1	1800	150	0.8	688	800	100	16	36.6	18.1
Altura do conector (hc) e altura da laje (h)	T-150/0.8/450/130/16/36.6/18.1/1	1800	150	0.8	688	450	130	16	36.6	18.1
	T-150/0.8/450/100/16/36.6/18.1/1	1800	150	0.8	688	450	100	16	36.6	18.1
	T-200/0.8/450/130/16/36.6/18.1/1	1800	200	0.8	688	450	130	16	36.6	18.1
Diâmetro do conector (D) e espessura da fôrma (t)	T-200/0.8/450/100/16/36.6/18.1/1	1800	200	0.8	688	450	100	16	36.6	18.1
	T-150/1.5/450/100/25/36.6/18.1/1	1800	150	1	688	450	100	25	36.6	18.1
	T-150/1.2/450/100/25/36.6/18.1/1	1800	150	1.2	688	450	100	25	36.6	18.1
	T-150/1.5/450/100/25/36.6/18.1/1	1800	150	1.5	688	450	100	25	36.6	18.1
	T-150/1.5/450/100/10/36.6/18.1/1	1800	150	1	688	450	100	10	36.6	18.1
	T-150/1.2/450/100/10/36.6/18.1/1	1800	150	1.2	688	450	100	10	36.6	18.1
Resistência à compressão (fc) e módulo de elasticidade (Ec)	T-150/1.5/450/100/10/36.6/18.1/1	1800	150	1.5	688	450	100	10	36.6	18.1
	T-150/0.8/450/100/16/25/25/1	1800	150	0.8	688	450	100	16	25	25
	T-150/0.8/450/100/16/25/35/1	1800	150	0.8	688	450	100	16	25	35
	T-150/0.8/450/100/16/40/25/1	1800	150	0.8	688	450	100	16	40	25
Número de conectores de cisalhamento	T-150/0.8/450/100/16/40/35/1	1800	150	0.8	688	450	100	16	40	35
	T-150/1.5/450/100/16/36.6/18.1/1	1800	150	1.5	688	450	100	16	36.6	18.1
	T-150/1.5/450/100/16/36.6/18.1/2	1800	150	1.5	688	450	100	16	36.6	18.1
	T-150/1.5/450/100/16/36.6/18.1/3	1800	150	1.5	688	450	100	16	36.6	18.1
	T-150/1.5/450/100/16/36.6/18.1/4	1800	150	1.5	688	450	100	16	36.6	18.1

Tabela 3.8 – Análise paramétrica das lajes reentrantes.

Parâmetro	ID	L (mm)	h (mm)	t (mm)	b (mm)	Ls (mm)	hc (mm)	D (mm)	fc (MPa)	Ec (GPa)
Vão de cisalhamento (Ls)	R-150/0.8/300/100/16/35/26.3/1	1800	150	0.8	720	300	100	16	35	26.3
	R-150/0.8/600/100/16/35/26.31/1	1800	150	0.8	720	600	100	16	35	26.3
	R-150/0.8/800/100/16/35/26.3/1	1800	150	0.8	720	800	100	16	35	26.3
Altura do conector (hc) e altura da laje (h)	R-150/0.8/450/130/16/35/26.3/1	1800	150	0.8	720	450	130	16	35	26.3
	R-150/0.8/450/100/16/35/26.3/1	1800	150	0.8	720	450	100	16	35	26.3
	R-200/0.8/450/130/16/35/26.3/1	1800	200	0.8	720	450	130	16	35	26.3
	R-200/0.8/450/100/16/35/26.3/1	1800	200	0.8	720	450	100	16	35	26.3
Diâmetro do conector (D) e espessura da fôrma (t)	R-150/1/450/100/25/35/26.3/1	1800	150	1	720	450	100	25	35	26.3
	R-150/1.2/450/100/25/35/26.3/1	1800	150	1.2	720	450	100	25	35	26.3
	R-150/1.5/450/100/25/35/26.3/1	1800	150	1.5	720	450	100	25	35	26.3
	R-150/1/450/100/10/35/26.3/1	1800	150	1	720	450	100	10	35	26.3
	R-150/1.2/450/100/10/35/26.3/1	1800	150	1.2	720	450	100	10	35	26.3
	R-150/1.5/450/100/10/35/26.3/1	1800	150	1.5	720	450	100	10	35	26.3
Resistência à compressão (fc) e módulo de elasticidade (Ec)	R-150/0.8/450/100/16/25/25/1	1800	150	0.8	720	450	100	16	25	25
	R-150/0.8/450/100/16/25/35/1	1800	150	0.8	720	450	100	16	25	35
	R-150/0.8/450/100/16/40/25/1	1800	150	0.8	720	450	100	16	40	25
	R-150/0.8/450/100/16/40/35/1	1800	150	0.8	720	450	100	16	40	35
Número de conectores de cisalhamento	R-150/1.5/450/100/16/35/26.3/1	1800	150	1.5	720	450	100	16	35	26.3
	R-150/1.5/450/100/16/35/26.3/2	1800	150	1.5	720	450	100	16	35	26.3
	R-150/1.5/450/100/16/35/26.3/3	1800	150	1.5	720	450	100	16	35	26.3
	R-150/1.5/450/100/16/35/26.3/4	1800	150	1.5	720	450	100	16	35	26.3

3.5. Resultados

3.5.1. Modelos analíticos

Após estudo paramétrico, foram comparados os valores de capacidade última previstos pelos modelos numéricos e pelos procedimentos analíticos previstos no item 3.2.2 e 3.2.3.4. Os resultados são resumidos nas Tabelas 3.9 e 3.10, em que V_u é carga suportada pelos modelos numéricos, P_t a força resistente ao cisalhamento longitudinal dada como $V_u/2$ e $V_{u/m-k}$ é a força resistente ao cisalhamento longitudinal obtida a partir do método $m-k$ e V_{us} a força resistente ao cisalhamento longitudinal obtida no método presente no BS5950-Part4.

No método $m-k$ as constantes m e k foram obtidas pelos autores Bai et al (2020) e Li et al (2017) a partir de ensaios experimentais realizados para lajes mistas com e sem conectores de cisalhamento. As constantes obtidas por Bai et al (2020) foram $m = 231.1 N/mm^2$ e $k = -0.17 N/mm^2$ para as lajes trapezoidais. Li et al (2017) obteve, para as lajes reentrantes, os coeficientes $m = 159.6 N/mm^2$ e $k = 0.22 N/mm^2$. No método $m-k$ desconsidera-se a resistência da laje de concreto e a resistência ao escoamento.

Tabela 3.9 – Método m-k e método da norma BS5950-Part4 para as lajes mistas com conector de cisalhamento e perfil trapezoidal.

ID	Método m-k				Método BS5950-Part4	
	Vu (kN)	Pt (kN)	V _{u/mk} (kN)	$\frac{V_{u/m-k}}{P_t}$	V _{us} (kN)	$\frac{V_{us}}{P_t}$
ST-F-Ls300	110.84	55.42	57.49	1.04	72.72	1.31
ST-F-Ls600	55.44	27.72	22.19	0.80	29.80	1.08
ST-F-Ls800	40.98	20.49	13.37	0.65	19.08	0.93
ST-F-h150-hc130	74.52	37.26	33.96	0.91	44.11	1.18
ST-F-h150-hc100	73.81	36.91	33.96	0.92	44.11	1.20
ST-F-h200-hc130	129.07	64.54	49.23	0.76	65.54	1.02
ST-F-h200-hc100	127.56	63.78	49.23	0.77	65.54	1.03
ST-F-t1-D25	88.18	44.09	45.73	1.04	56.18	1.27
ST-F-t1.2-D25	98.75	49.38	57.49	1.16	68.25	1.38
ST-F-t1.5-D25	110.85	55.43	75.14	1.36	86.36	1.56
ST-F-t1-D10	76.12	38.06	45.73	1.20	56.18	1.48
ST-F-t1.2-D10	84.72	42.36	57.49	1.36	68.25	1.61
ST-F-t1.5-D10	100.41	50.21	75.14	1.50	86.36	1.72
ST-F-fc25-E25	59.80	29.90	33.96	1.14	44.67	1.49
ST-F-fc25-E35	57.37	28.68	33.96	1.18	44.67	1.56
ST-F-fc40-E25	72.23	36.12	33.96	0.94	44.00	1.22
ST-F-fc40-E35	69.11	34.56	33.96	0.98	44.00	1.27
ST-F-t1.5-1C	94.70	47.35	75.14	1.59	86.36	1.82
ST-F-t1.5-2C	109.54	54.77	75.14	1.37	90.09	1.64
ST-F-t1.5-3Ca	128.33	64.17	75.14	1.17	93.83	1.46
ST-F-t1.5-3Cb	116.26	58.13	75.14	1.29	93.83	1.61
ST-F-t1.5-4C	136.55	68.28	75.14	1.10	97.57	1.43

Tabela 3.10 – Método m-k e método da norma BS5950-Part4 para as lajes mistas com conector de cisalhamento e perfil reentrante.

ID	Método m-k				Método BS5950-Part4	
	Vu (kN)	Pt (kN)	V _{u/mk} (kN)	$\frac{V_{u/m-k}}{P_t}$	V _{us} (kN)	$\frac{V_{us}}{P_t}$
SR-F-Ls300	239.25	119.62	91.73	0.77	115.15	0.96
SR-F-Ls600	127.89	63.94	56.39	0.88	68.10	1.06
SR-F-Ls800	97.25	48.63	47.55	0.98	56.33	1.16
SR-F-h150-hc130	177.39	88.70	68.17	0.77	83.78	0.94
SR-F-h150-hc100	173.97	86.99	68.17	0.78	83.78	0.96
SR-F-h200-hc130	271.55	135.78	93.83	0.69	115.60	0.85
SR-F-h200-hc100	270.13	135.07	93.83	0.69	115.60	0.86
SR-F-t1-D25	198.09	99.04	79.95	0.81	95.90	0.97
SR-F-t1.2-D25	213.74	106.87	91.73	0.86	108.01	1.01
SR-F-t1.5-D25	231.25	115.62	109.41	0.95	126.19	1.09
SR-F-t1-D10	170.14	85.07	79.95	0.94	95.90	1.13
SR-F-t1.2-D10	174.17	87.08	91.73	1.05	108.01	1.24
SR-F-t1.5-D10	179.44	89.72	109.41	1.22	126.19	1.41
SR-F-fc25-E25	148.55	74.27	68.17	0.92	84.31	1.14
SR-F-fc25-E35	140.86	70.43	68.17	0.97	84.31	1.20
SR-F-fc40-E25	182.80	91.40	68.17	0.75	83.61	0.91
SR-F-fc40-E35	172.26	86.13	68.17	0.79	83.61	0.97
SR-F-t1.5-1C	204.01	102.01	109.41	1.07	126.19	1.24
SR-F-t1.5-2C	220.67	110.34	109.41	0.99	131.78	1.19
SR-F-t1.5-3Ca	234.67	117.34	109.41	0.93	137.37	1.17
SR-F-t1.5-3Cb	234.45	117.23	109.41	0.93	137.37	1.17
SR-F-t1.5-4C	240.40	120.20	109.41	0.91	142.97	1.19

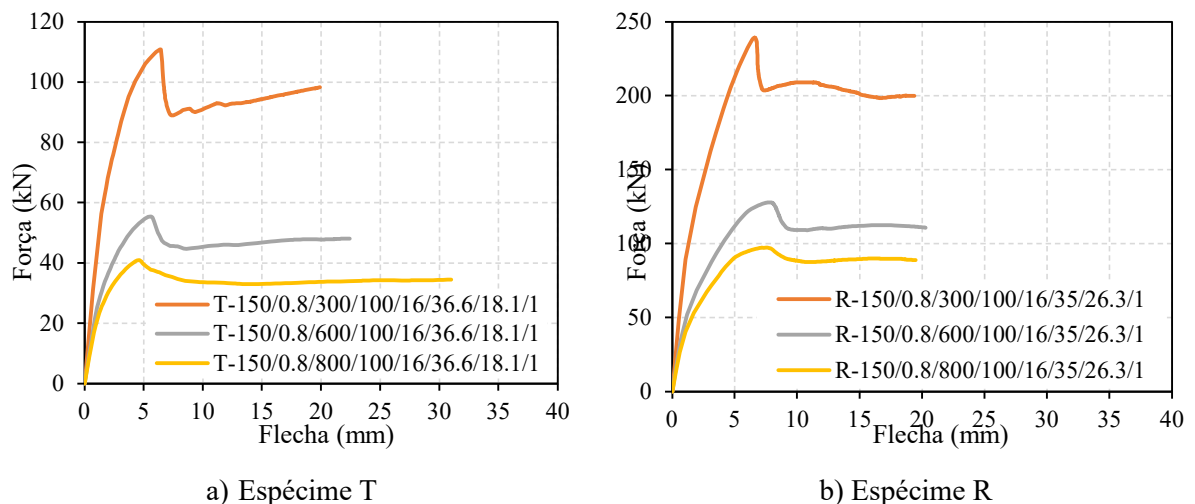
O método m-k é influenciado principalmente pela altura da laje de concreto, vão de cisalhamento e espessura da fôrma. Por outro lado, não leva em consideração os fatores relacionados as propriedades mecânicas do concreto e a presença dos conectores de cisalhamento. Por isso, observa-se que nos protótipos em que foi avaliado as propriedades do concreto e a quantidade de conectores, o V_u obtido foi o mesmo. Além disso, protótipos de mesma espessura, mas com conectores de cisalhamento com diâmetro diferentes, também obtiveram mesmo V_u . Apesar disso, de modo geral, os resultados obtidos pelo método *m-k* se relacionam de forma regular ao obtido de modo numérico.

No segundo método, disposto na norma BS5950-Part4, foi utilizada na equação para cálculo de V_{us} (Eq.9) a força resistente ao cisalhamento longitudinal obtida no método *m-k*. Apesar disso, observa-se que, os resultados quando comparados ao obtido no modelo numérico, foram satisfatórios.

3.5.2. Vão de cisalhamento

Assim como nas lajes sem conectores, o vão de cisalhamento (L_s) também possui grande influência na capacidade última das lajes mistas com conectores de cisalhamento, em que a capacidade última das lajes mistas reduz com o aumento do vão de cisalhamento, Figura 3.25. Nas lajes mistas com maiores vão de cisalhamento as tensões cisalhantes na interface são menores quando comparadas as lajes mistas de menores vãos de cisalhamento. Desse modo, lajes com menores vãos cisalhantes, resultam numa maior tensão cisalhamento na interface, o que implica numa maior resistência ao deslizamento relativo entre os materiais, como também observado por Chen e Shi (2011).

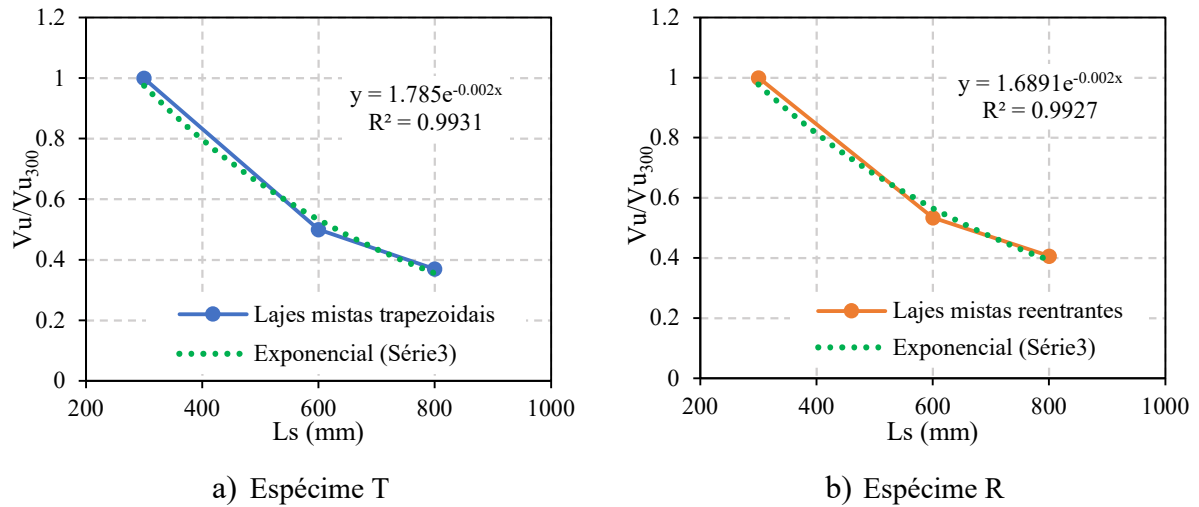
Figura 3.25 – Comparativo no gráfico força x flecha da influência do vão de cisalhamento nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



Fonte: O autor.

Na Figura 3.29 é ilustrado a relação entre a capacidade última de cada laje em relação a capacidade última alcançada pelas lajes com $L_s = 300$ mm de cada série. Ou seja, na análise das lajes com forma trapezoidais, a capacidade estimada para as lajes dessa série foi dividida pela capacidade obtida para a laje trapezoidal com L_s de 300 mm. O mesmo se aplica as lajes com fôrma reentrante. A equação mostrada na Figura 3.26 foi obtida a partir da regressão do conjunto de pontos formados pelas lajes com fôrmas reentrantes e trapezoidais.

Figura 3.26 – Influência do vão de cisalhamento nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.

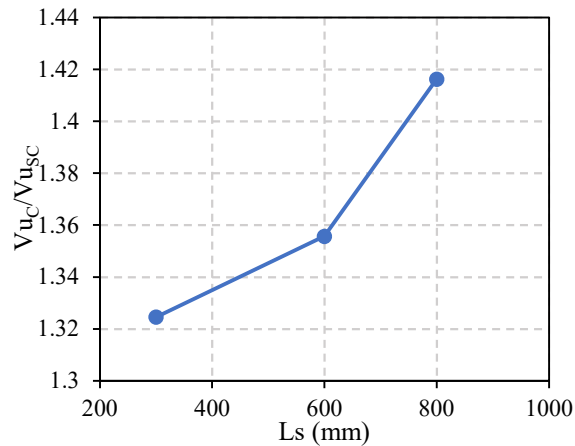


Fonte: O autor.

O aumento do vão de cisalhamento de 300 para 600 mm, resulta na redução da capacidade última (V_u) em 50% em lajes trapezoidais e 46,5% em lajes com fôrmas reentrantes. Para o aumento do vão cisalhante de 600 para 800 mm observa-se uma redução de 26,1% em lajes trapezoidais e 24% em lajes reentrantes. Observa-se, portanto, que há uma leve diferença na redução da capacidade última e pode ser atribuído a influência da geometria da fôrma reentrante, que permite o efeito de confinamento do concreto, aumentando o grau de conexão entre os materiais e contribuindo para uma maior capacidade resistente. A equação, obtida através de regressão exponencial e representada na Figura 3.26, teve boa precisão na representação para descrever os resultados obtidos.

Na Figura 3.26 são comparadas as cargas previstas para as lajes com conectores e suas contrapartes sem conector (V_{uc}/V_{usc}). Da Figura 3.27 observa-se que a presença dos conectores contribui para o aumento da capacidade última das lajes mistas. Nas lajes trapezoidais de L_s de 300mm, por exemplo, a presença do conector resulta no aumento de 32,5% na capacidade última. A contribuição dos conectores no aumento da capacidade última das lajes mistas também foi observada por outros autores (BAI et al., 2020; LI et al., 2017; DEGTYAREV, 2014; CHEN, 2003; JEONG et al., 2009).

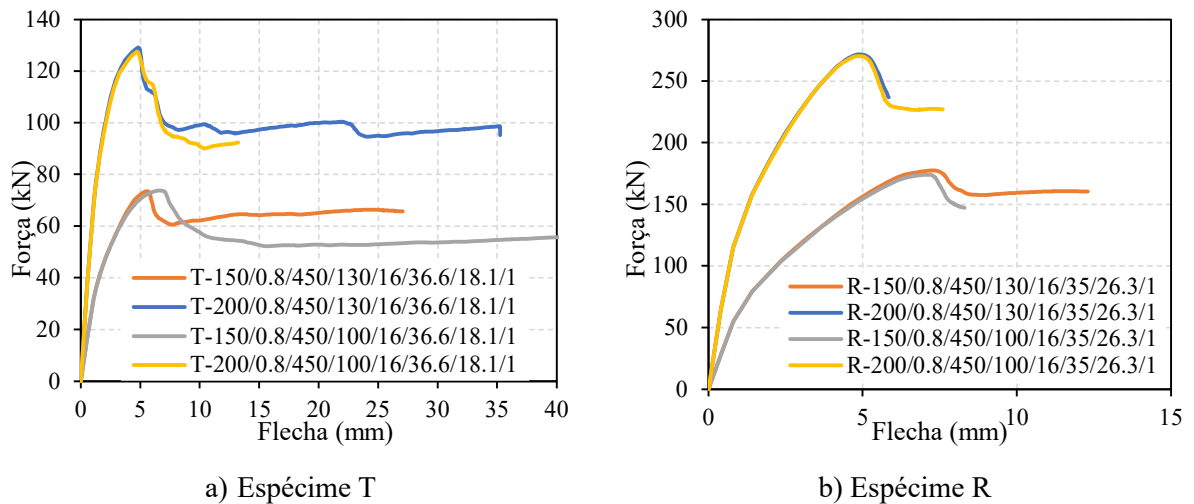
Figura 3.27 – Comparativo de lajes mistas com fôrma trapezoidal com e sem conectores de cisalhamento.



3.5.3. Altura do conector e altura da laje

A fim de avaliar a influência da altura dos conectores na laje de concreto, foram simulados modelos com conectores de 100 e 130 mm de altura em lajes com espessura de 150 e 200 mm. As curvas Força vs flecha estão indicadas na Figura 3.27.

Figura 3.27 – Comparativo gráfico força x flecha da influência da altura da laje de concreto e do conector de cisalhamento nas lajes mistas de perfil trapezoidal e reentrante.

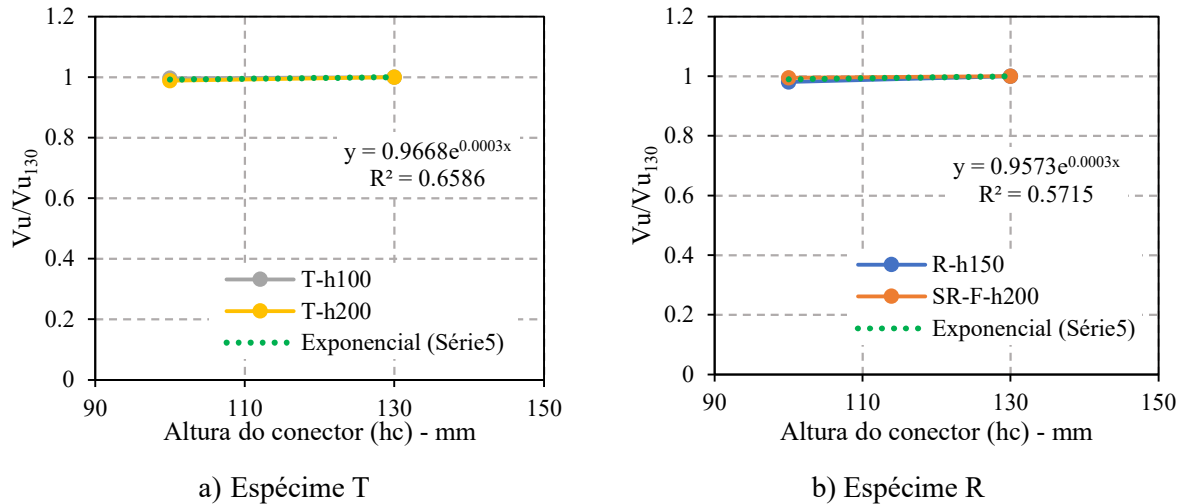


Fonte: O autor.

Da comparação entre modelos com laje trapezoidais e reentrantes de mesma altura e conectores com alturas diferentes, observa-se que não houve influência significativa da altura dos conectores na capacidade última prevista pelos modelos, em que, para ambos os perfis, o aumento da altura do conector de cisalhamento resultou em um acréscimo de 2% na capacidade última das lajes. A pequena influência da altura do conector de cisalhamento na carga última alcançada pelas lajes mistas também foi observada por Katwal et al (2021). O

comparativo dos resultados está mostrado na Figura 3.28, em que o eixo y é dado pela relação entre a capacidade última dos protótipos e a capacidade última observada para os protótipos com conector de altura h_c de 130 mm.

Figura 3.28 – Influência da altura do conector nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



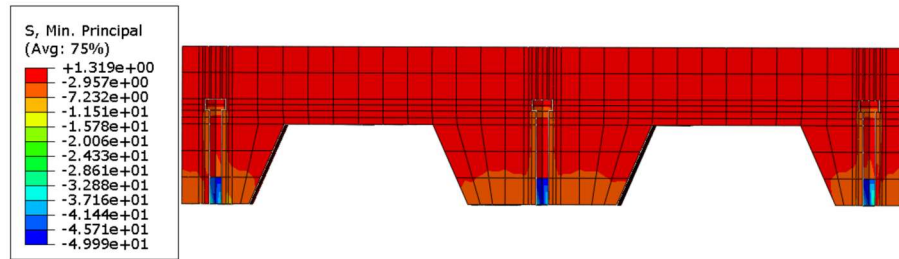
Fonte: O autor.

Nos protótipos trapezoidais, foi observado que a falha ocorreu devido a uma combinação do escoamento da fôrma de aço na região próxima ao conector de cisalhamento, o esmagamento do concreto na região do conector e elevado dano a tração do concreto na região de aplicação de carga.

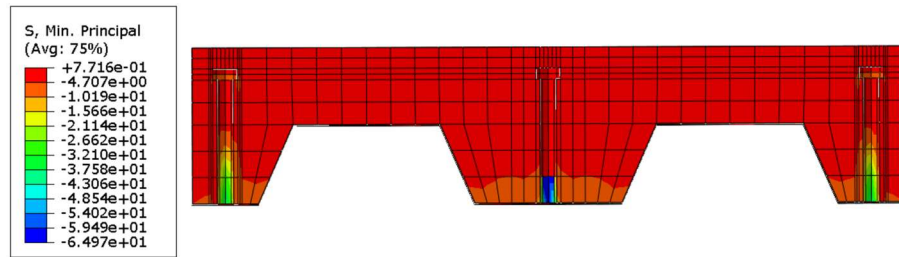
Os protótipos reentrantes, assim como os protótipos trapezoidais, apresentaram no momento da falha o escoamento da fôrma na região em torno dos conectores e esmagamento do concreto na região do conector. Além disso, o efeito de confinamento do concreto no interior das nervuras contribuiu para o aumento da capacidade última quando comparada as lajes mistas trapezoidais.

A baixa influência da altura do conector de cisalhamento na capacidade última pode ser atribuída à falha prematura do concreto em torno dos conectores de cisalhamento, o que faz com que a capacidade última dos conectores não seja completamente mobilizada. Tal comportamento também foi observado por Katwal et al (2021). A Figura 3.29 ilustra, por exemplo, as tensões mínimas ao redor do conector quando é alcançado a capacidade última para os protótipos T-150/0.8/100/16/36.6/18.1/1 e T-150/0.8/100/16/36.6/18.1/1. Observa-se que, na carga última, as tensões compressão resistente no concreto já haviam sido superadas.

Figura 3.29– Tensões mínimas principais na região do conector nas lajes trapezoidais.



a) T-150/0.8/100/16/36.6/18.1/1

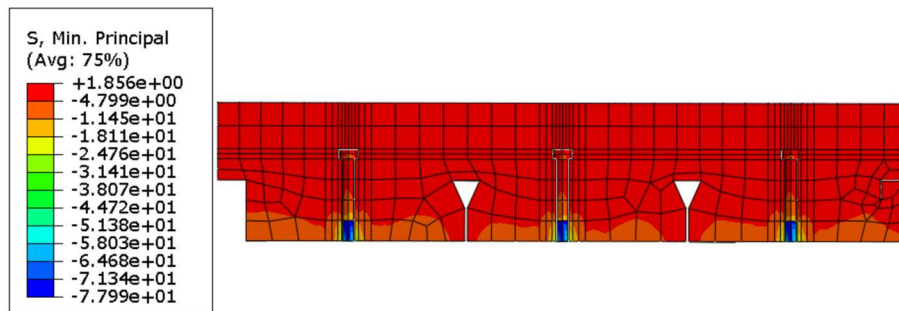


b) T-150/0.8/130/16/36.6/18.1/1

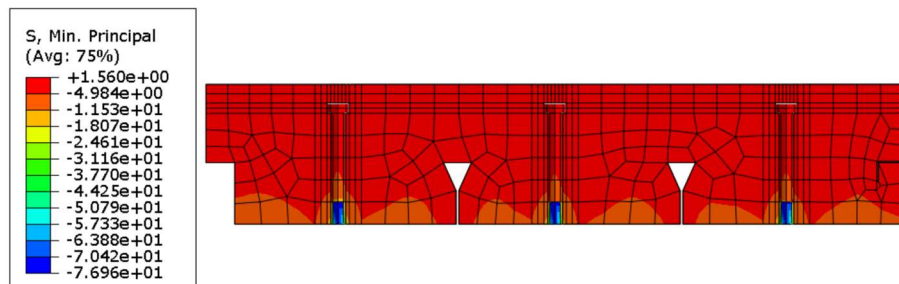
Fonte: O autor.

Nas lajes com perfil reentrante, a formação do cone de concreto à compressão também foi observado, como ilustra a Figura 3.30 para o protótipo R-150/0.8450/100/16/35/26.3/1.

Figura 3.30 – Tensões mínimas principais na região do conector na laje reentrantes.



a) R-150/0.8450/100/16/35/26.3/1

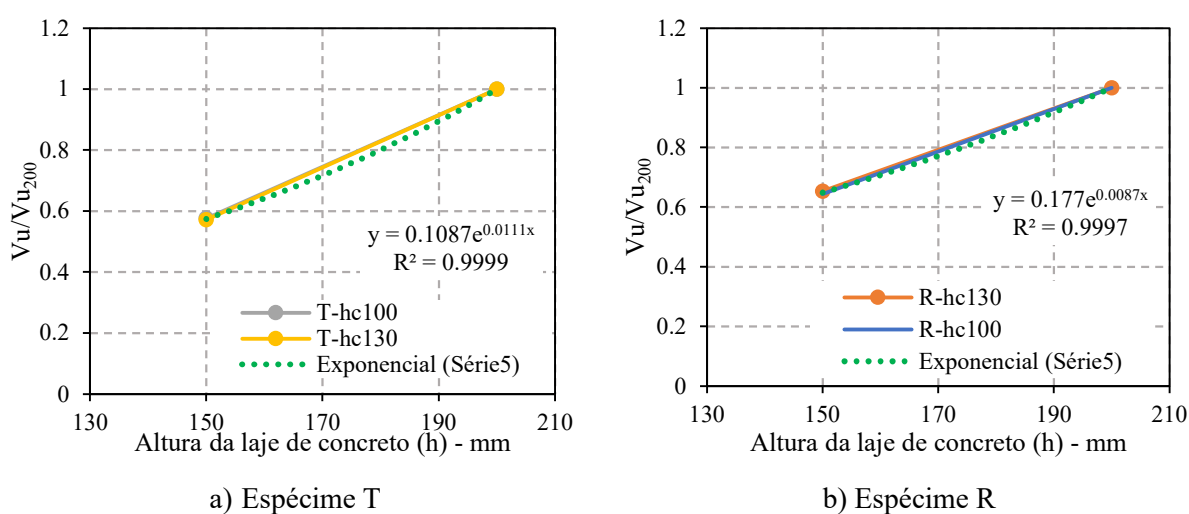


b) R-150/0.8450/130/16/35/26.3/1

Fonte: O autor.

A influência da altura da laje de concreto na capacidade última das lajes é mostrada na Figura 3.31. Ao se comparar lajes com diferentes alturas e conectores com mesmo comprimento observa-se aumento da carga última alcançada pelos protótipos. Nas lajes trapezoidais com conectores o aumento da altura da laje de concreto de 150 para 200mm resultou num aumento de 42% enquanto nos protótipos reentrantes o aumento foi de 36%. Além disso, a equação de regressão exponencial apresentada para os protótipos apresentou excelente convergência.

Figura 3.31 – Influência da altura da laje de concreto nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes com conector de cisalhamento.



Fonte: O autor.

Assim, o aumento da altura da laje de concreto tem grande contribuição na capacidade última de lajes mistas com conectores de cisalhamento. Esse impacto era esperado devido a influência da altura da laje de concreto sobre o momento de inércia da seção transversal da laje mista, permitindo com que haja melhor distribuição das tensões ao longo da seção transversal da laje. O aumento da inércia, resultado do aumento da altura da laje de concreto, resulta no aumento da rigidez das lajes mistas com conectores de cisalhamento.

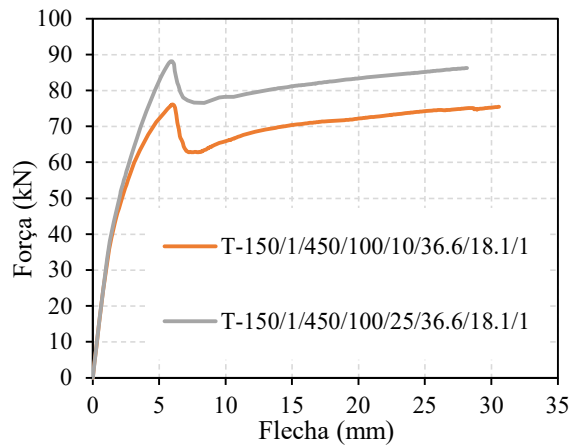
3.5.4. Diâmetro do conector e espessura da fôrma

a) Diâmetro do conector

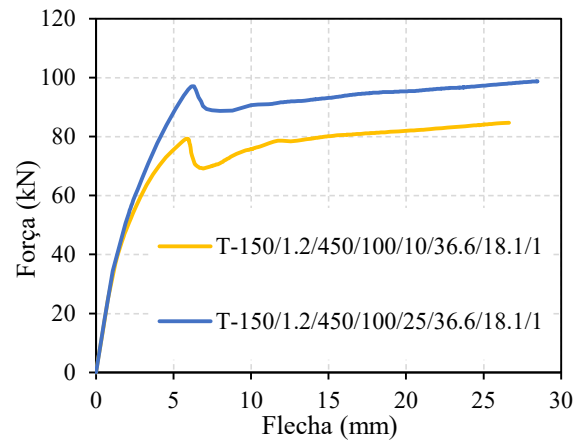
A influência do diâmetro do conector na capacidade última das lajes mistas foi conduzida considerando três diferentes espessuras de fôrma de aço (1,1.2 e 1.5 mm). As curvas Força vs Flecha estão ilustradas na Figura 3.32. Dos resultados observa-se que o aumento do diâmetro do conector resulta no aumento da capacidade última das lajes mistas.

Nas lajes trapezoidais, observa-se a rápida recuperação do sistema após a ruptura da adesão, o que ocorre devido à mobilização dos conectores. O sistema volta a suportar acréscimos de carga até a ocorrência da plastificação dos conectores e da fôrma (na região próxima aos conectores). Nas lajes reentrantes, o sistema não se recupera totalmente após a ruptura da adesão, pois houve esmagamento do concreto no interior das nervuras.

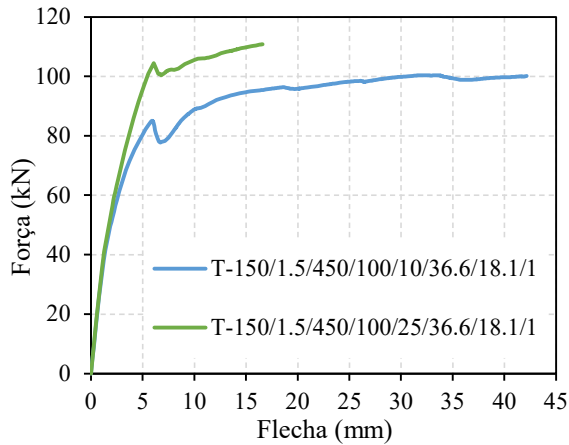
Figura 3.32 – Comparativo no gráfico força x flecha da influência do diâmetro do conector nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



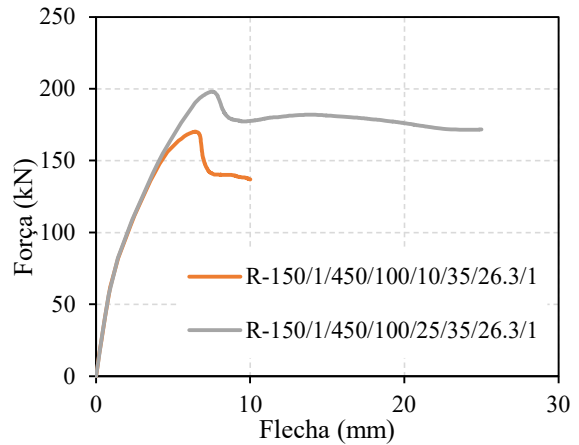
a) Espécime T-t1



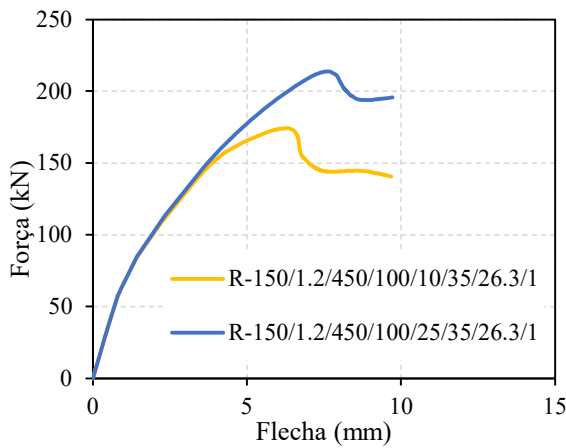
b) Espécime T-t1



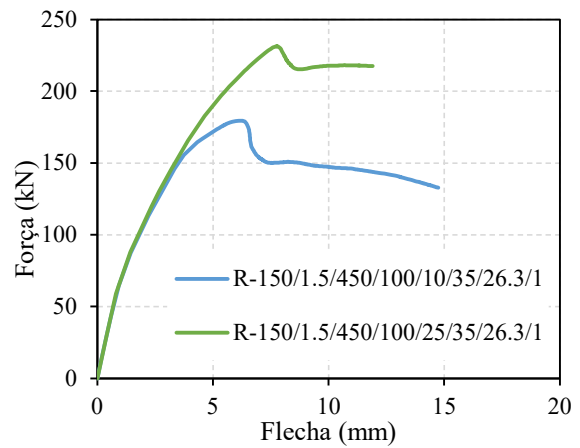
c) Espécime T-t1.5



d) Espécime R-t1



e) Espécime R-t1.2

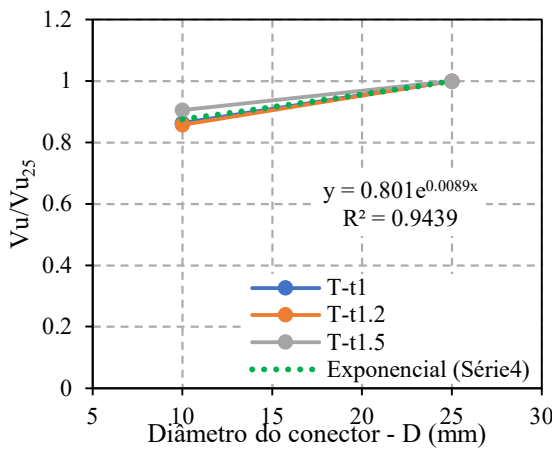


f) Espécime R-t1.5

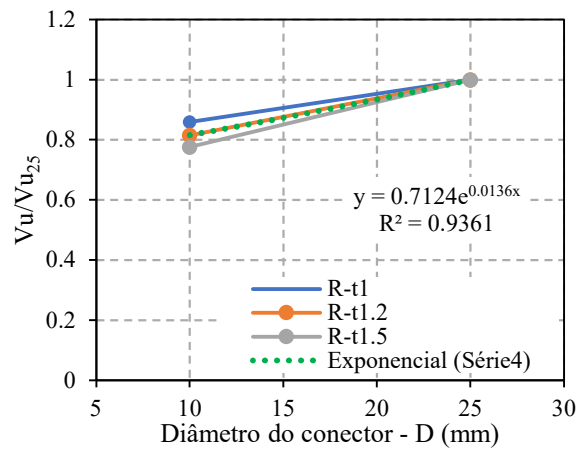
Fonte: O autor.

Na Figura 3.32 é ilustrada a relação entre a carga última (V_u) e a carga última máxima (V_{u25}) que aconteceu para o diâmetro de 25 mm. Foi traçado uma curva de regressão para os protótipos, formada pelo conjunto de pontos que compõe as lajes com fôrmas trapezoidais e reentrantes.

Figura 3.32 – Influência do diâmetro do conector nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes com conector de cisalhamento.



a) Espécime T



b) Espécime R

Fonte: O autor.

Para as lajes trapezoidais, com espessura de 1 mm ocorre aumento de 11% na capacidade última quando aumenta o diâmetro de conector de 10 para 25mm, enquanto nas lajes de fôrma reentrante esse aumento é de 14%. Observa-se que o aumento do diâmetro do conector possui maior influência na capacidade última nas lajes mistas com fôrmas de espessura 1.5 mm. Isso ocorre pois o aumento do diâmetro do conector nas lajes de menor

espessura é acompanhado do escoamento da fôrma na região dos conectores, ocorrendo mais cedo, ou seja, para menores capacidades últimas, do que nas lajes de espessura de 1.5 mm.

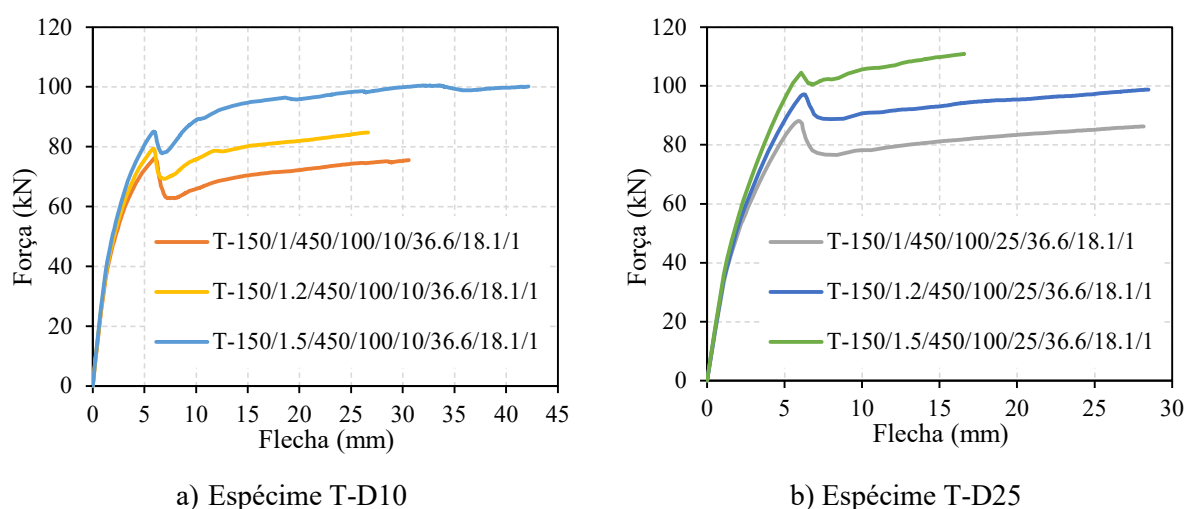
Nas lajes trapezoidais, mantida a espessura da fôrma, o menor diâmetro do conector (10 mm) resulta no escoamento do conector no momento da falha. Ao aumentar o diâmetro do conector, foi observado que a região de escoamento passa ser na fôrma de aço, na região em torno do conector. A exceção aconteceu apenas na laje de menor espessura da fôrma (1mm) e menor diâmetro do conector (10 mm), em que os dois efeitos foram observados juntos no momento da falha (escoamento do conector e da fôrma na região em torno do conector).

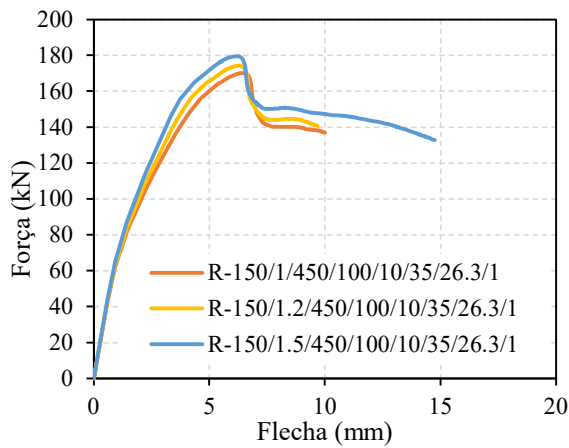
Nas lajes reentrantes, para o diâmetro de 10 mm, há o escoamento do conector de cisalhamento e da fôrma de aço na região em torno do conector quando a capacidade última é alcançada. Ao aumentar o diâmetro do conector, o escoamento no momento da falha passa a ser apenas na fôrma de aço e em duas regiões: na região em torno do conector de cisalhamento e na região de momento máximo.

b) Espessura da fôrma de aço

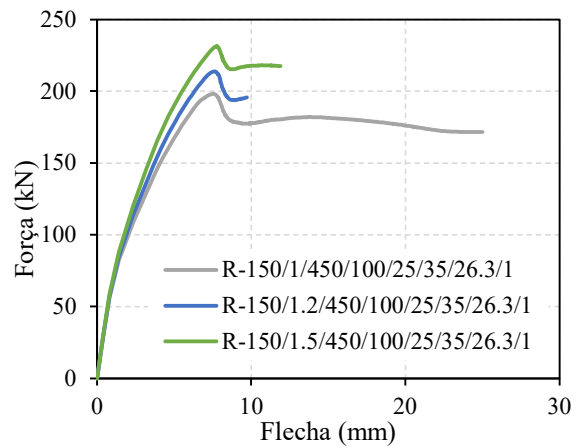
A influência da espessura da fôrma de aço na capacidade última de lajes mistas com conectores de cisalhamento foi avaliada para dois diâmetros de conector (10 e 25 mm). Na Figura 3.33 estão ilustradas as curvas Força vs Flecha. Dos resultados observa-se que o aumento da espessura da fôrma de aço resulta no aumento da capacidade última das lajes mistas com conectores de cisalhamento, uma vez que aumenta a rigidez da fôrma de aço.

Figura 3.33 – Comparativo no gráfico força x flecha da influência da espessura da fôrma de aço nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.





c) Espécime R-D10

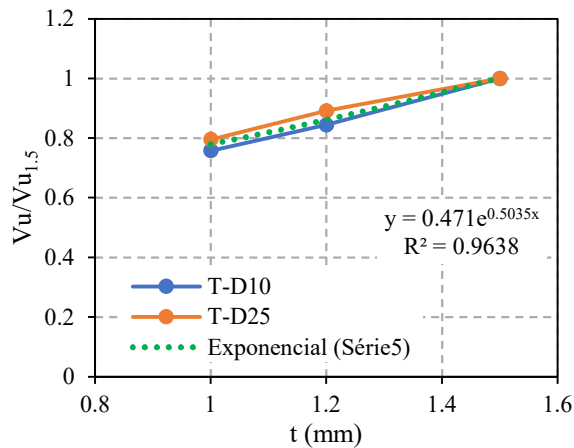


d) Espécime R-D25

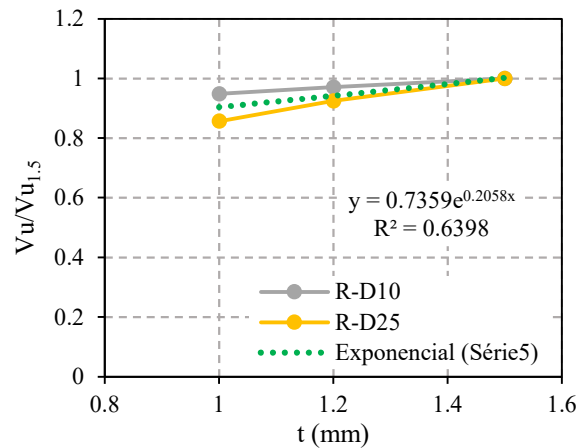
Fonte: O autor.

Na Figura 3.34 é ilustrada a relação entre a carga última (V_u) e a carga última máxima ($V_{u1.5}$) que aconteceu para a espessura da fôrma de aço de 1.5 mm. Foi traçado uma curva de regressão para os protótipos, formada pelo conjunto de pontos que compõe as lajes com fôrmas trapezoidais e reentrantes.

Figura 3.34 –Influência da espessura da fôrma nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes com conector de cisalhamento.



a) Espécime T



b) Espécime R

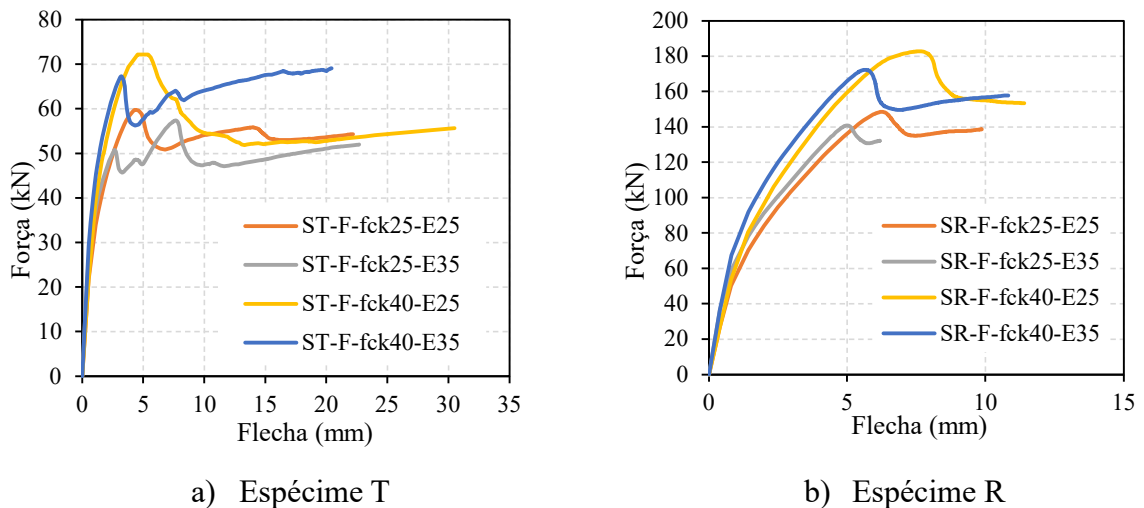
Fonte: O autor.

Nas lajes trapezoidais com conector de 10mm de diâmetro, o maior aumento na capacidade última é observado quando há o aumento da espessura de 1.2 para 1.5mm, com diâmetro de 10mm, resultando no aumento da capacidade última de 16%. Para as lajes reentrantes esse aumento foi de 8%.

3.5.5. Resistência a compressão e módulo de elasticidade

Com relação à laje de concreto, além da altura da laje, foi avaliada a influência da resistência à compressão (f_c) e o módulo de elasticidade do concreto (E_c) na capacidade última alcançada pelas lajes mistas, Figura 3.35.

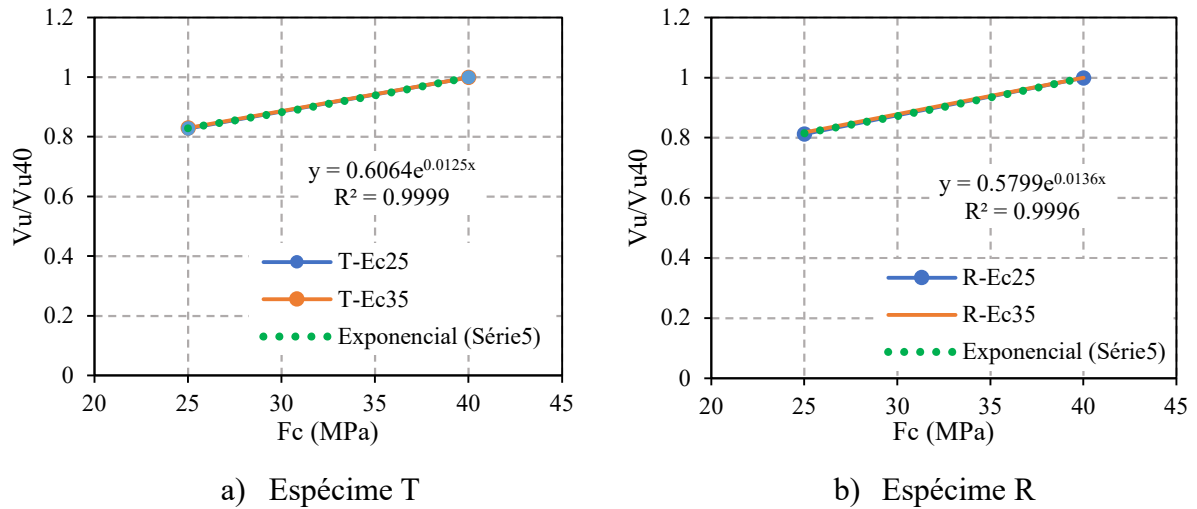
Figura 3.35 – Comparativo da curva força x flecha da influência da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



Fonte: O autor.

A Figura 3.36 demonstra a relação entre a capacidade última (V_u) e a carga última máxima (V_{u40}) que ocorre para lajes mistas com resistência à compressão de 40 MPa. A equação presente na Figura 3.36 foi obtida através de regressão exponencial para os conjuntos de pontos das lajes trapezoidais e reentrantes, em que foi possível obter uma equação de alta precisão. A partir da Figura 3.36, observa-se que, em lajes com mesmo módulo de elasticidade, o aumento de f_c resulta em aumento na capacidade última das lajes mistas. Nas lajes trapezoidais, esse aumento foi em torno de 20% enquanto nas lajes reentrantes foi de 23%. A diferença entre as contribuições pode ser atribuída ao confinamento do concreto nas lajes reentrantes.

Figura 3.36 – Influência da resistência à compressão na capacidade última das lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes com conectores de cisalhamento.



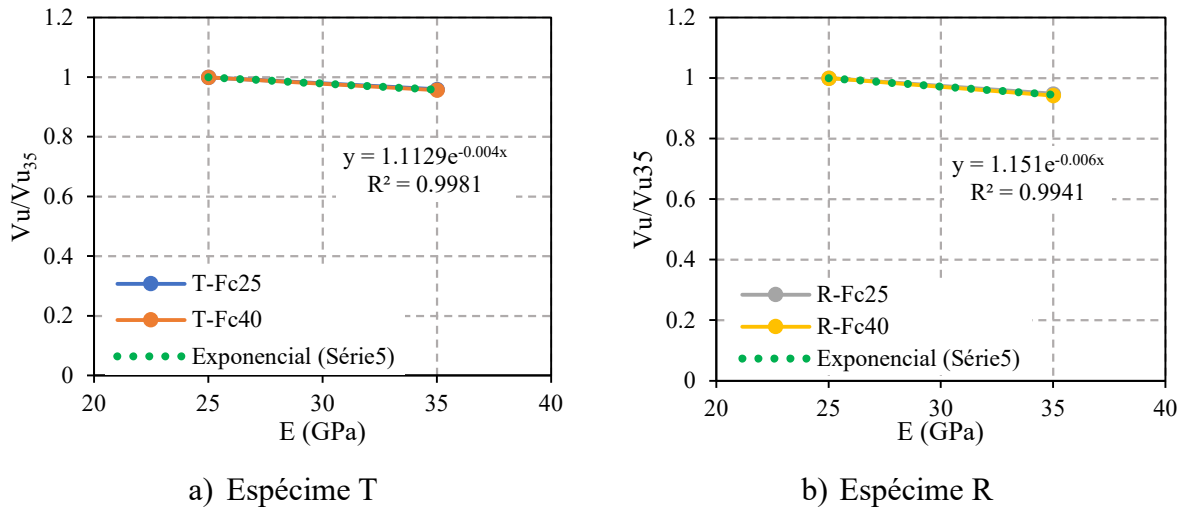
Fonte: O autor.

Nas lajes mistas, com fôrmas trapezoidal e reentrante, o aumento da resistência à compressão do concreto (de 25 MPa para 40 MPa) resulta numa maior rigidez do concreto. Por isso, nas lajes de 40 MPa é possível observar um dano maior à tração na região de aplicação de carga e uma maior tensão à compressão nas regiões dos conectores.

Nas lajes reentrantes é possível alcançar tensões maiores, no momento da capacidade última, do que nas lajes de perfil trapezoidais. Por exemplo, nas lajes trapezoidais de Fc 25 MPa e Ec de 25GPa, as tensões de Von Mises no momento da falha na região do conector é de 53.53 MPa, enquanto nas lajes reentrantes é de 62.9 MPa. Isso se deve a configuração dos perfis reentrantes que permitem uma maior conexão na interface aço concreto e, com isso, mobilizam maior força na região dos conectores.

Na Figura 3.37 foi avaliada a influência do módulo de elasticidade nas lajes mistas com conectores de cisalhamento. O eixo y representa a relação entre a capacidade última (V_u) e a capacidade última máxima (V_{u35}), que ocorre para os protótipos de módulo de elasticidade de 35 GPa. É observado que o aumento no módulo de elasticidade resulta numa baixa contribuição no aumento da capacidade última das lajes. Nas lajes trapezoidais esse aumento é de 4%, enquanto nas lajes reentrantes é de 6%. A partir dos conjuntos de pontos, foi possível obter uma equação de regressão exponencial com boa precisão.

Figura 3.37 – Influência do módulo de elasticidade na capacidade última das lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes com conectores de cisalhamento.

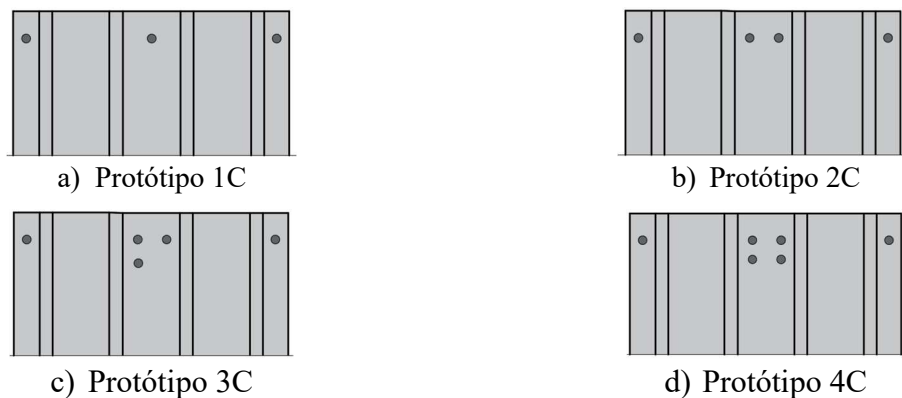


Fonte: O autor.

3.5.6. Número de conectores de cisalhamento

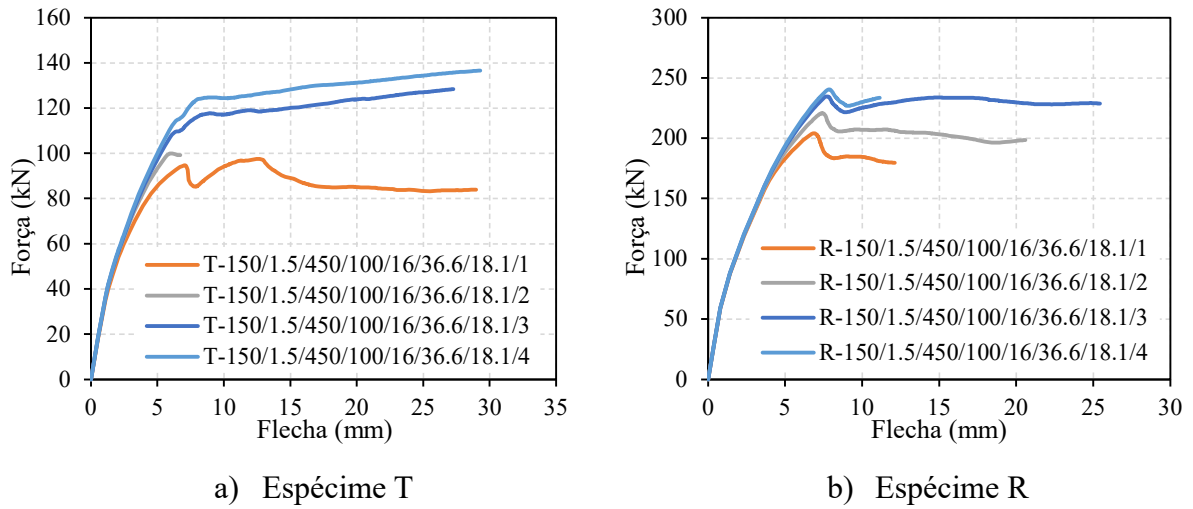
As lajes mistas foram avaliadas com 1, 2, 3 e 4 conectores de cisalhamento, na mesa inferior central da fôrma de aço, acrescido de um conector em cada uma das extremidades laterais, conforme ilustrado na Figura 3.38. Nas lajes com apenas 1 conector, ele foi posicionado no meio da onda baixa da fôrma de aço. Nas demais situações, os conectores foram posicionados seguindo as recomendações presentes na NBR8800 e EN-4. Segundo as normas, deve-se respeitar, na direção transversal à força cisalhante, uma distância mínima entre conectores igual a quatro vezes o diâmetro do conector e , na direção longitudinal, a distância entre conectores deve ser superior a cinco vezes o diâmetro do conector. Os resultados obtidos estão resumidos na Figura 3.39.

Figura 3.38 – Posicionamento dos conectores nos protótipos testados.



Fonte: O autor.

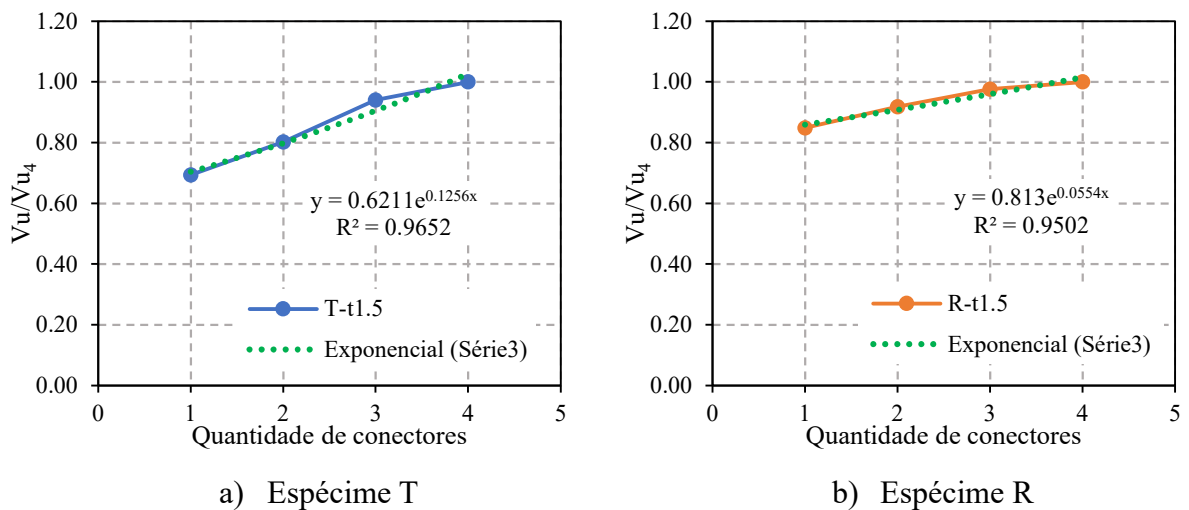
Figura 3.39 – Comparativo da curva força x flecha da influência do número de conectores nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



Fonte: O autor.

Na Figura 3.40 são comparadas a relação entre a capacidade última das lajes (V_u) e a capacidade última máxima (V_{u4}), que corresponde as lajes com quatro conectores. Nas lajes reentrantes, há um acréscimo em torno de 10% ao aumentar o número de conectores de 1 para 2. Nas lajes reentrantes, a contribuição do aumento do número de conectores é levemente menor quando comparada as lajes trapezoidais, contribuindo em 7%, por exemplo, no aumento da capacidade última quando há 2 conectores na mesa inferior central da fôrma de aço. O aumento da capacidade última que ocorre ao aumentar de um para dois conectores se deve ao aumento da resistência ao deslizamento relativo entre os materiais.

Figura 3.40 – Influência do número de conectores nas lajes mistas de fôrmas trapezoidais e reentrantes.



Fonte: O autor.

Nas lajes mistas com três conectores, tanto nas lajes com fôrmas trapezoidais quanto reentrantes, há um nível elevado de tensões na fôrma de aço, escoando toda a região dos conectores e suas adjacências, devido a interação dos pinos lado a lado. Por isso, há baixa contribuição na capacidade última ao aumentar o número de conectores de três para quatro conectores (6% nas lajes trapezoidais e 4% nas lajes reentrantes).

3.6. Conclusão

A modelagem numérica permitiu investigar a influência de diferentes parâmetros no comportamento e capacidade resistente de lajes mistas de aço e concreto com conector de cisalhamento. Destaca-se:

1. A presença do conector de cisalhamento, seja nas lajes com fôrmas trapezoidais ou reentrantes, resultam no aumento da capacidade última por contribuir ao impedimento do livre deslizamento relativo entre a fôrma de aço e a laje de concreto;
2. A relação entre o vão de cisalhamento e a capacidade última também se mostrou inversamente proporcional nas lajes mistas com conectores de cisalhamento;
3. O aumento da altura da laje de concreto influencia na capacidade última e na rigidez das lajes mistas uma vez que resulta no aumento da inércia, o que resulta numa melhor distribuição dos esforços na seção transversal;
4. A altura do conector se mostrou pouco influente no aumento da capacidade última e isso se deve a falha prematura do concreto em torno dos conectores de cisalhamento;
5. O aumento do diâmetro do conector resulta no aumento da capacidade última das lajes, uma vez que o diâmetro muito pequeno resulta no escoamento do conector antes que haja o melhor aproveitamento das propriedades do aço presente na fôrma e da laje de concreto.
6. O aumento da espessura da laje de concreto também resulta no aumento da capacidade última, por aumentar a região contribuinte de aço e, por consequência, a rigidez a flexão;
7. O aumento da resistência a compressão do concreto possui maior influência em lajes mistas reentrantes, quando comparadas as lajes trapezoidais. E a isso pode ser atribuída ao efeito de confinamento do concreto. Já o módulo de elasticidade possui baixa influência na capacidade última das lajes mistas;

8. A quantidade de conectores aumenta a conexão do elemento misto e, por consequência, sua capacidade última. Contudo, a partir de três conectores, as áreas de escoamento da fôrma de aço aumentaram, o que resulta numa menor contribuição na capacidade última o aumento de conectores a partir deste.

CAPÍTULO 4. CONCLUSÃO GERAL

4.1. Considerações gerais

Neste trabalho foi investigado a influência de parâmetros geométricos e mecânicos no comportamento global e local de lajes mistas de aço e concreto com fôrmas de perfil trapezoidal e perfil reentrante e com conector de cisalhamento do tipo *stud bolt*, biapoiadas e sujeitas a flexão à quatro pontos. Esse estudo foi realizado a partir de um modelo numérico desenvolvido no software Abaqus, considerando a não linearidade dos materiais e da interface aço-concreto, a partir de modelos calibrados com resultados experimentais dos autores Bai et al (2020) e Li et al (2017).

Nas lajes mistas sem conectores de cisalhamento foram avaliadas a influência do vão de cisalhamento, da altura da laje de concreto, da espessura da fôrma de aço, a resistência a compressão do concreto e a resistência ao escoamento da fôrma de aço. Foi observado que o vão de cisalhamento é inversamente proporcional a capacidade última, ou seja, o aumento do vão de cisalhamento resulta em diminuição da capacidade última das lajes mistas, sendo esse um dos fatores que mais afetaram a capacidade resistência das lajes. O aumento da altura da laje de concreto resulta em um aumento significativo da capacidade última, enquanto a espessura afeta em menor proporção. A baixa contribuição da espessura pode estar associada a modelagem das fôrmas sem a presença das mossas.

Além disso, foi possível observar a influência da geometria do perfil da fôrma, uma vez que a geometria reentrante permite o confinamento do concreto e, por consequência, capacidade última maior, quando comparada as lajes de perfil trapezoidal. A resistência ao escoamento da fôrma de aço foi o único parâmetro que não afetou a capacidade última, afetando apenas o comportamento pós pico. As lajes foram avaliadas quando ao método *m-k* proposto pela EN-4 e os resultados foram regulares. Além disso foi possível obter equações que descreveram as linhas de tendência dos parâmetros avaliados com certa precisão.

Nas lajes com conectores de cisalhamento foram investigadas a influência do vão de cisalhamento, altura da laje de concreto, espessura da fôrma de aço, resistência a compressão e módulo de elasticidade do concreto, diâmetro, altura e quantidade de conectores de cisalhamento. Os conectores de cisalhamento se mostraram efetivos no aumento da capacidade última quando comparado as lajes sem conectores, uma vez que impedem o livre deslizamento relativo entre a fôrma de aço e a laje de concreto. Os parâmetros que influenciaram no aumento da capacidade última das lajes sem conectores também

influenciaram no comportamento das lajes com conectores. Os modos de falha foram diferentes, uma vez que o grau de conexão das lajes com conectores de cisalhamento é maior que nas lajes sem conectores de cisalhamento.

Foi possível observar que dos parâmetros geométricos avaliados referentes aos conectores de cisalhamento (diâmetro e altura), o diâmetro mostrou maior contribuição na capacidade última, uma vez que diâmetros pequenos levam ao escoamento do conector antes que a capacidade dos demais materiais sejam utilizadas de maneira mais efetiva. O aumento da quantidade de conectores também resulta no aumento da capacidade última, contudo a partir de três conectores essa contribuição passa a ser menor, devido a interação entre os conectores e aumento da região de escoamento da fôrma de aço. Além disso, a capacidade última prevista pelos modelos foram avaliados quanto a capacidade prevista no método $m-k$ e no método presente no BS5950-Part4 e tiveram regular aproximação.

4.2. Sugestões para estudos futuros

Como temas para trabalhos futuros, sugerem-se:

- avaliação da influência da espessura da fôrma nas lajes mistas com as mossas discretizadas nas fôrmas de aço;
- avaliação da influência de diferentes tipos de conectores na capacidade última das lajes mistas;
- avaliação da influência dos conectores de cisalhamento em diferentes disposições na capacidade última das lajes mistas;
- proposição de equações que permitam considerar a contribuição dos conectores de cisalhamento na capacidade última das lajes mistas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, R.; SAMUEL EASTERLING, W. New evaluation and modeling procedure for horizontal shear bond in composite slabs. **Journal of Constructional Steel Research**, Apr. 2009. v. 65, n. 4, p. 891–899.
- ABNT. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- AHMED, I. M.; TSAVDARIDIS, K. D. The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and eurocode design approaches. **Journal of Constructional Steel Research**, Apr. 2019. v. 155, p. 286–300. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X18307296>>.
- AN KRISTER; CEDERWALL, L. **Scholars' Mine Scholars' Mine Composite Slabs Analyzed by Block Bending Test Composite Slabs Analyzed by Block Bending Test**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <<https://scholarsmine.mst.edu/isccss/11iccfss/11iccfss-session5/1>>.
- ANSI. **ANSI/ASCE 3-91: Standard for the structural design of composite slabs**. American national standards institute/american society of civil engineers, 1992.
- ATAEI, A. *et al.* Finite element modelling of demountable precast reinforced concrete deck slabs with external confining system. **Journal of Constructional Steel Research**, 1 Dec. 2018. v. 151, p. 204–215.
- BAI, L. *et al.* Longitudinal shear behaviour of composite slabs with profiled steel sheeting and ECC. **Engineering Structures**, 15 Feb. 2020. v. 205.
- CALADO, L.; SANTOS, J. **Estruturas Mistas de aço e betão** 1ed, 2010.
- CBCA. Produção de estruturas em aço tem crescimento de 25,6% em 2019. Disponível em: <<https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/estatisticas/>>. Acesso em: 30 aug. 2021.
- CHEN, B. *et al.* Longitudinal shear tests and design methods for corrugated steel–concrete composite slabs with recycled coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 400, p. 132870–132870, 1 out. 2023.
- CHEN, S.; SHI, X. Shear bond mechanism of composite slabs - A universal FE approach. **Journal of Constructional Steel Research**, Oct. 2011. v. 67, n. 10, p. 1475–1484.
- CHEN, S.; SHI, X. Shear bond failure in composite slabs - A detailed experimental study. **Steel and Composite Structures**, Apr. 2011. v. 11, n. 3, p. 233-250.
- CHEN, S. Load carrying capacity of composite slabs with various end constraints. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 59, n. 3, p. 385–403, mar. 2003.

CIFUENTES, H.; MEDINA, F. Experimental study on shear bond behavior of composite slabs according to Eurocode 4. **Journal of Constructional Steel Research**, 2013. v. 82, p. 99–110.

DANIELS, B. J.; CRISINEL, M. **COMPOSITE SLAB BEHAVIOR AND STRENGTH ANALYSIS. PART h CALCULATION PROCEDURE**, 1993.

DEGTYAREV, V. V. Strength of composite slabs with end anchorages. Part I: Analytical model. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 94, p. 150–162, 1 mar. 2014.

DEGTYAREV, V. V. Strength of composite slabs with end anchorages. Part II: Parametric studies. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 94, p. 163–175, 1 mar. 2014.

EUROCODE 4. EN 1994-1-1: Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules for buildings. **European committee for standardization**, 2004.

FERRER, M.; MARIMON, F.; CASAFONT, M. An experimental investigation of a new perfect bond technology for composite slabs. **Construction and Building Materials**, 30 Mar. 2018. v. 166, p. 618–633.

CRISINEL, M. Designing cold-formed steel sheets for composite slabs: An experimentally validated FEM approach to slip failure mechanics. **Thin-Walled Structures**, Dec. 2007. v. 44, n. 12, p. 1261–1271.

GHOLAMHOSEINI, A. *et al.* Longitudinal shear stress and bond-slip relationships in composite concrete slabs. **Engineering Structures**, 15 Jun. 2014. v. 69, p. 37–48.

GROSSI, L. G. F.; SANTOS, C. F. R.; MALITE, M. Longitudinal shear strength prediction for steel-concrete composite slabs with additional reinforcement bars. **Journal of Constructional Steel Research**, 1 Mar. 2020. v. 166.

HANIFEHZADEH, M. *et al.* Structural Response of Steel Jacket-UHPC Retrofitted Reinforced Concrete Columns under Blast Loading. **Materials**, v. 14, n. 6, p. 1521, 20 mar. 2021.

HARTMEYER, S.; KURZ, W. **Evaluation of the Shear Force Behaviour of Composite Slabs**, 2013.

HENRIQUES, J.; SIMÕES DA SILVA, L.; VALENTE, I. B. Numerical modeling of composite beam to reinforced concrete wall joints. **Engineering Structures**, v. 52, p. 734–746, jul. 2013.

HISSEINE, O. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Shear-bond behavior of nanocellulose-modified SHCC composite slabs: Translating material-level capacity into improved structural performance. **Engineering Structures**, v. 291, p. 116394, 15 set. 2023.

HOSSAIN, K. M. A. *et al.* High performance composite slabs with profiled steel deck and Engineered Cementitious Composite – Strength and shear bond characteristics. **Construction and Building Materials**, 30 Oct. 2016. v. 125, p. 227–240.

HOSSAIN, K. M. A. *et al.* Finite element modelling of profiled steel deck composite slab system with engineered cementitious composite under monotonic loading. **Engineering Structures**, 1 May. 2019. v. 186, p. 13–25.

JEONG, Y.-J.; KIM, H.-Y.; KOO, H.-B. Longitudinal shear resistance of steel–concrete composite slabs with perfobond shear connectors. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 65, n. 1, p. 81–88, jan. 2009.

KHAN, M. K. I.; LEE, C. K.; ZHANG, Y. X. Numerical modelling of engineered cementitious composites-concrete encased steel composite columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 170, p. 106082, jul. 2020.

KOH, C.; TENG, M.; WEE, T. A plastic-damage model for Lightweight Concrete and normal weight concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 2, n. 2, p.123-136, dec. 2008.

LAM, D. *et al.* Recent research on composite beams with demountable shear connectors. **Steel Construction**, v. 10, n. 2, p. 125–134, maio 2017.

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

LANGARUDI, P.; EBRAHIMNEJAD, M. Numerical study of the behavior of bolted shear connectors in composite slabs with steel deck. **Structures**, 1 Aug. 2020. v. 26, p. 501–515.

LI, X. *et al.* Experimental study on the longitudinal shear bond behavior of lightweight aggregate concrete – Closed profiled steel sheeting composite slabs. **Construction and Building Materials**, 15 Dec. 2017. v. 156, p. 599–610.

LIU, Y. *et al.* Size effect on tensile strength of lightweight aggregate concrete: A numerical investigation. **Construction and Building Materials**, v. 323, p. 126541, 14 mar. 2022.

LIU, X. *et al.* Bond-slip properties between lightweight aggregate concrete and rebar. **Construction and Building Materials**, v. 255, p. 119355–119355, 1 set. 2020.

MARIMUTHU, V. *et al.* Experimental studies on composite deck slabs to determine the shear-bond characteristic (m - k) values of the embossed profiled sheet. **Journal of Constructional Steel Research**, Jun. 2007. v. 63, n. 6, p. 791–803.

MENG, D. et al. Mechanical behaviour of a polyvinyl alcohol fibre reinforced engineered cementitious composite (PVA-ECC) using local ingredients. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 259–270, jun. 2017.

MOHAMMED, B. S. *et al.* Longitudinal shear resistance of PVA-ECC composite slabs. **Structures**, 2016. v. 5, p. 247–257.

MOHAMMED, B. S.; AL-GANAD, M. A.; ABDULLAHI, M. Analytical and experimental studies on composite slabs utilising palm oil clinker concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3550–3560, ago. 2011.

MOHAMMED, B. S. Structural behavior and m–k value of composite slab utilizing concrete containing crumb rubber. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1214–1221, jul. 2010.

MOLINA, J.; RUIZ, M.; MONTES, E.; CRUZ, A. Bond strength of galvanized steel: experimental and numerical study based on pull-out tests. **International Conference on Mechanical Models Structural Engineering**. Jun, 2015.

MOSLEMI, A. et al. Proposing and finite element analysis of a new composite profiled sheet deck – Applying PU and PVC and stability considerations. **Structures**, v. 34, p. 3040–3054, dez. 2021.

MOSLEMI, A. et al. Proposing and finite element analysis of a new composite profiled sheet deck. **Structures**, v. 27, p. 70–85, out. 2020.

PATRICK, M.; BRIDGE, R. Q. **Scholars' Mine Scholars' Mine Review of Concepts Concerning Bond of Steel Decking Review of Concepts Concerning Bond of Steel Decking**. Disponível em: <<https://scholarsmine.mst.edu/isccss/12iccfss/12iccfss-session6/3>>.

PATRICK, M.; BRIDGE, R. Q. Partial shear connection design of composite slabs. **Engineering Structures**, v. 16, n. 5, p. 348–362, 1 jul. 1994.

PEREIRA, M.; RUI SIMÕES; CRAVEIRO, H. Conception and design of high-performance steel-concrete composite slabs. **ce/papers**, v. 4, n. 2-4, p. 706–714, 1 set. 2021.

PEREIRA, M.; SIMÕES, R. Contribution of steel sheeting to the vertical shear capacity of composite slabs. **Journal of Constructional Steel Research**, 1 Oct. 2019. v. 161, p. 275–284.

RANA, M. M.; UY, B.; MIRZA, O. Experimental and numerical study of end anchorage in composite slabs. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 115, p. 372–386, 1 dez. 2015.

REZAEIAN, H.; CLIFTON, G. C.; LIM, J. B. P. Failure modes for composite steel deck diaphragms subjected to in-plane shear forces – A review. **Engineering Failure Analysis**, v. 107, p. 104199, jan. 2020.

RÍOS, J. D. *et al.* Numerical modelling of the shear-bond behaviour of composite slabs in four and six-point bending tests. **Engineering Structures**, 15 Feb. 2017. v. 133, p. 91–104.

RODRIGUES, Y. O. **Análise numérica e experimental do comportamento da interface aço-concreto de lajes mistas**. São Carlos: [s.n.], 2020.

SCHUURMAN, R. G.; STARK, J. W. B.; INGENIEURSBUREAU, R. **LONGITUDINAL SHEAR RESISTANCE OF COMPOSITE SLABS-A NEW MODEL**.

SHEN, M. H.; CHUNG, K. F. Structural Behaviour of Stud Shear Connections with Solid and Composite Slabs Under Co-Existing Shear and Tension Forces. **Structures**, 1 Feb. 2017. v. 9, p. 79–90.

SHIRGAONKAR, A. A.; PATIL, Y. D.; PATIL, H. S. Influence of stiffeners and pattern of shear screws on behaviour of cold formed profiled deck composite floor. **Case Studies in Construction Materials**, 1 Dec. 2021. v. 15.

SIMON, J.; VISUVASAM, J.; BABU, S. Study on shear embossments in steel-concrete composite slab. [S.l.]: Institute of Physics Publishing, 2017. V. 263.

SOHEL, K. M. A.; LIEW, J. Y. R.; FARES, A. I. Shear bond behavior of composite slabs with ultra-lightweight cementitious composite. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103284, 1 dez. 2021.

SOLTANALIPOUR, M.; FERRER, M.; MARIMON, F. Experimental and numerical study of the ductility of open-rib and reentrant composite slabs. **Engineering Structures**, v. 256, p. 113984, 1 abr. 2022.

SOLTANALIPOUR, M. *et al.* An Experimental and Numerical Study of the Load Distribution Effect on Composite Slab Shear Resistance. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, 2019. p. 101–106.

TAHIR, MAHMOOD MD; SHEK, POI NGIAN; TAN, CHER SIANG. Push-off tests on pin-connected shear studs with composite steel-concrete beams. **Journal of Constructional Steel Research**, Apr. 2009.

VELJKOVIC, M. Influence of Load Arrangement on Composite Slab Behaviour and Recommendations for Design. **Department of Civil and Mining Engineering - Division of Steel Structures**, 1997.

VELJKOVIC, M. Behaviour and Resistance of Composite Slabs - Experiments and Finit Element Analysis. **Department of Civil and Mining Engineering - Division of Steel Structures**, 1996.

WANG, J. *et al.* Cyclic behavior tests and evaluation of CFS truss composite floors. **Journal of Building Engineering**, 2021. v. 35, n. November 2020, p. 101974.

WANG, J. et al. Static behavior of large stud shear connectors in steel-UHPC composite structures. **Engineering Structures**, v. 178, p. 534–542, 1 jan. 2019.

WU, Z.; XU, Y.; ŠAVIJA, B. Mechanical Properties of Lightweight Cementitious Cellular Composites Incorporating Micro-Encapsulated Phase Change Material. **Materials**, v. 14, n. 24, p. 7586, 10 dez. 2021.

XIAO, J.-L. et al. Flexural behavior of steel-UHPC composite slabs with perfobond rib shear connectors. **Engineering Structures**, v. 245, p. 112912, out. 2021.

YI, O. *et al.* Push-off and Pull-out Bond Behaviour of CRC Composite Slabs – An Experimental Investigation. **Engineering Structures**, 1 Feb. 2021. v. 228.

YI, O. et al. Performance of crumb rubber concrete composite-deck slabs in 4-point-bending. **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102695, ago. 2021.