



**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**GISELE COELHO DE SOUSA**

**ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO: ANÁLISE TEÓRICA  
DE VIGAS MISTAS COMPOSTAS POR PERFIS METÁLICOS E  
LAJES TRELIÇADAS**

**FORTALEZA**

**2021**

**GISELE COELHO DE SOUSA**

**ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO: ANÁLISE TEÓRICA  
DE VIGAS MISTAS COMPOSTAS POR PERFIS METÁLICOS E  
LAJES TRELIÇADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

Orientador: Prof. Me. Ésio Magalhães  
Feitosa Lima

**FORTALEZA**

**2021**

**GISELE COELHO DE SOUSA**

**ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO: ANÁLISE TEÓRICA DE VIGAS  
MISTAS COMPOSTAS POR PERFIS METÁLICOS E LAJES TRELIÇADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

Orientador: Prof. Me. Ésio Magalhães  
Feitosa Lima

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Me. Ésio Magalhães Feitosa Lima  
Faculdade Ari de Sá

---

Prof. Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro  
Faculdade Ari de Sá

---

Prof. Me./Dr. (Nome do Avaliador Externo)  
Nome da Faculdade/Universidade do Avaliador 2

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio e incentivo e aos amigos pelos momentos de ausência.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela presença irrefutável em minha vida.

Aos meus pais, pelos inúmeros incentivos e pela certeza partilhada de que eu conseguiria.

Aos meus amigos por todo o apoio e incentivo, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor Ésio Magalhães, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e compreensão.

Finalmente, a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

O primeiro passo é estabelecer que algo é possível; então a probabilidade ocorrerá.  
(Elon Musk)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Faculdade Ari de Sá  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S725e Sousa, Gisele Coelho de.

Estruturas Mistas De Aço e Concreto: análise teórica de vigas mistas compostas por perfis metálicos e lajes treliçadas / Gisele Coelho de Sousa. – 2021.

55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade Ari de Sá, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Me. Ésio Magalhães Feitosa Lima.

1. Estrutura mista. 2. Vigas metálicas. 3. Lajes de vigotas pré-moldadas. 4. Conector de cisalhamento. 5. Análise teórica. I. Título.

CDD 620

---

## RESUMO

A utilização de estruturas mistas surgiu da necessidade de inovação nas técnicas construtivas que atendessem as concepções arquitetônicas cada vez mais ousadas. Avaliando as vantagens e desvantagens dos materiais que compõem as estruturas mistas. Optou-se pela utilização de vigas em perfis metálicos, laje treliçada e conectores de cisalhamento flexíveis. Assim, a relevância deste trabalho é notória pelo fato desse arranjo ser incomum e possuir pouco acervo técnico e ao mesmo tempo serem bastante usuais na construção civil de forma isolada. Por isso, será realizado esse estudo teórico do comportamento estrutural da viga mista proposta, onde será apresentada as principais características das estruturas mistas aço-concreto, será descrito os esforços mecânicos atuantes na região de interface, apresentando os fatores significativos no seu combate (grau de conexão e grau de interação) e a importância da utilização de conectores de cisalhamento na interface entre os materiais. Por tratar-se de uma análise teórica, os resultados aqui apresentados serão baseados nas conclusões obtidas por outros autores, que realizaram ensaios utilizando os mesmos componentes propostos. Vale ressaltar que o intuito deste trabalho não é dimensionar uma estrutura mista, mas, explicar seu comportamento e propor um bom arranjo das peças. Assim, foi possível concluir que num aspecto geral os objetivos propostos foram alcançados.

**Palavras-chave:** Estrutura mista. Vigas metálicas. Lajes de vigotas pré-moldadas. Conector de cisalhamento. Análise teórica.



## ABSTRACT

The use of composite structures arose from the need for innovation in construction techniques that would meet increasingly bold architectural concepts. Assessing the advantages and disadvantages of the materials that make up the composite structures. We opted for the use of beams in metal profiles, lattice slab and flexible shear connectors. Thus, the relevance of this work is notorious for the fact that this arrangement is unusual and has little technical collection and, at the same time, they are quite common in civil construction in isolation. Therefore, this theoretical study of the structural behavior of the proposed composite beam will be carried out, where the main characteristics of the composite steel-concrete structures will be presented, the mechanical efforts acting in the interface region will be described, presenting the significant factors in its combat (degree of connection and degree of interaction) and the importance of using shear connectors at the interface between materials. As this is a theoretical analysis, the results presented here will be based on the conclusions obtained by other authors, who carried out tests using the same proposed components. It is noteworthy that the purpose of this work is not to dimension a composite structure, but to explain its behavior and propose a good arrangement of the pieces. Thus, it was possible to conclude that, in general, the proposed objectives were achieved.

**Keywords:** Composite structures. Steel beams. Floor system with lattice girder beams. Shear connectors. Theoretical analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Seção Típica de Viga Mista. ....	18
Figura 2 - Diagrama de deformações em vigas mistas. ....	20
Figura 3 - Vigas Mistas Fletidas. ....	21
Figura 4 - Seção com deslizamento relativo.....	23
Figura 5 - Diagramas de esforços mecânicos para cada grau de interação. ....	23
Figura 6 - Distribuição de Tensões em Viga Mista. ....	24
Figura 7 - Tipos de Vigas Mistas com Perfil I. ....	25
Figura 8 - Laje treliçada.....	26
Figura 9 - Vigota pré-moldadas. ....	27
Figura 10 - Armadura da Vigota Treliçada.....	28
Figura 11 - Tipos de fissura na laje. ....	28
Figura 12 - Perfil I.....	31
Figura 13 - Perfil H. ....	31
Figura 14 - Perfil U. ....	31
Figura 15 - Perfil T.....	31
Figura 16 - Processo de soldagem do conector. ....	33
Figura 17 - Modelos de Conectores. ....	33
Figura 18 - Relação Força x Deslocamentos em conectores.....	34
Figura 19 - Conector pino com cabeça (Stud).....	35
Figura 21 - Tipos de colapso sofrido pelo conector.....	36
Figura 22 - Seção transversal das vigas mistas ensaiadas.....	43
Figura 23 - Posição dos conectores e das armaduras das vigas mistas VM1 e VM5. .....	43
Figura 24 - Posição dos conectores e das armaduras das vigas mistas VM4 e VM7. .....	44
Figura 25 - Posição dos conectores e das armaduras das vigas mistas VM2, VM3, VM6 e VM8.....	44
Figura 26 - Ensaio de cisalhamento direto. ....	45
Figura 27 - Conjunto de elementos usados na viga mista.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado do dimensionamento estrutural. ....	39
Tabela 2 - Consumo de aço da estrutura. ....	39
Tabela 3 - Conectores utilizados no ensaio de cisalhamento direto.....	41
Tabela 4 - Composição da nomenclatura dos conectores. ....	42
Tabela 5 - Descrição das vigas. ....	42
Tabela 6 - Resistência à compressão dos corpos de provas de concreto. ....	48
Tabela 7 - Resumo das características dos aços dos perfis e armaduras. ....	48

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
3.1 ESTRUTURAS MISTAS .....	17
3.2 LAJE TRELIÇADA .....	25
3.3 VIGA METÁLICA .....	29
3.4 CONECTORES MECÂNICOS .....	31
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
<b>5 VIGA MISTA DE PERFIS METÁLICOS ASSOCIADOS A LAJES TRELIÇADAS..</b> .....	<b>38</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As construções cívicas vêm evoluindo – devido ao surgimento de novas necessidades, decorrentes da urbanização e crescimento populacional - e conseqüentemente desencadeando novos impasses de execução e viabilização de projetos. Isso contribuiu para busca por soluções inovadoras, o que resultou no desenvolvimento de novos materiais e ferramentas, aperfeiçoamento das técnicas construtivas e concepções arquitetônica e estrutural mais ousadas e alternativas. Esses processos passaram a ser regidos por normas, de forma a sempre respeitar os principais preceitos da engenharia civil: segurança, economia e conforto do usuário.

Dentre os sistemas construtivos contemporâneos, a utilização de estruturas mistas torna-se cada vez mais corriqueira, o que pode ser entendido como uma busca pelo aperfeiçoamento do sistema tradicional de concreto armado. Para Tineo (2016) o sistema misto de aço e concreto compreende a união de aspectos positivos dos materiais de maior utilização na construção civil, naturalmente buscando minimizar os pontos fracos de cada um destes materiais. Alva (2000) situa que, a história da construção mista está intimamente ligada ao desenvolvimento do concreto armado e das estruturas de aço. Griffis (1994) localiza que, as primeiras obras a utilizarem um sistema estrutural misto surgiram nos Estados Unidos no fim do século XIX e o seu uso se intensificou já no século XX por volta da década de 20.

Fuzihara (2006) afirma que as primeiras estruturas de aço sob lajes de concreto armado foram projetadas admitindo-se que a laje e a estrutura metálica funcionavam independentemente, a laje só se apoiava na viga que era calculada para suportar todo o carregamento imposto. Para Pfeil (2009), a participação da laje no trabalho da viga só passou a ser considerado após a 2ª Guerra Mundial, com a carência de aço após a guerra, os engenheiros europeus passaram a utilizar laje de concreto como parte componente do vigamento e realizaram pesquisas nesse âmbito.

Rodrigues (2018) cita que, no Brasil, as primeiras construções mistas restringiram-se a alguns edifícios e pequenas pontes que foram construídas entre os anos de 1950 e 1960. Conforme Malite (1990), os principais projetos de estruturas mistas foram desenvolvidos pelo engenheiro Paulo Fragoso, mais precisamente no Sudeste/Sul do país. Ainda para Rodrigues (2018), o aumento considerável da produção de aço no país nos últimos anos, aumentou significativamente a utilização do mesmo na construção, assim como, contribuiu para o desenvolvimento de

pesquisas nessa área para compreender o comportamento dos materiais dessa solução construtiva, que ampliou-se a partir do final da década de 80.

A principal norma brasileira referente ao desenvolvimento de projeto de estruturas mistas é a NBR 8800 (ABNT, 2008), nomeada Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios, sua primeira versão foi elaborada em 1986, mas somente na segunda edição (2008) é que se incluiu pilares mistos, lajes mistas e ligações mistas de aço e concreto.

A escolha pela utilização entre estruturas convencionais (concreto armado, metálica e madeira) e estruturas mistas (união de pelo menos dois dos materiais convencionais), se dá pela comparação das vantagens e desvantagens, construtivas e estruturais de cada sistema. Dentre as inúmeras vantagens das estruturas mistas, a que primordialmente foi considerada na união aço-concreto, foi o fato de o concreto proteger o aço da corrosão e a proteção contra o fogo, assim, o concreto tinha principalmente a função de revestimento. Partindo desses proveitos e pela necessidade de utilização desse sistema, fomentou-se estudos e discussões sobre os comportamentos dessa solução construtiva, que resultou na caracterização das propriedades dos materiais atuando em conjunto.

Kotinda (2006) relata que as primeiras pesquisas a respeito das vigas mistas aço-concreto foram realizadas por meio de modelos experimentais. Atualmente, com o avanço dos microcomputadores estudos de caráter numérico (com base no Método dos Elementos Finitos) têm ocorrido com maior frequência.

O sistema de estruturas mista é vantajoso pelos seguintes fatores: consegue vencer grandes vãos e balanços, pois cada elemento será destinado a atuar em um único esforço mecânico específico para suas propriedades; redução dos deslocamentos, levando em consideração que os elementos estarão conectados de forma a atuar como uma peça única, dando mais rigidez ao elemento; maior produtividade, no caso da utilização de perfil metálico e vigota treliçada, essas peças são compradas já confeccionadas, necessitando basicamente da montagem; menor geração de resíduos, pois os elementos são produzidos fora do canteiro, o que influencia também na redução do desperdício de materiais; alivia o peso próprio da estrutura, pois minora o uso do volume de concreto e por utilizar peças mais esbeltas, e conseqüentemente atenua o carregamento na fundação.

Em contrapartida, apresenta as seguintes desvantagens: necessita de mão-de-obra especializada, principalmente na etapa de ligação entre os diferentes

materiais, o que pode aumentar os custos da obra; o uso indispensável de conectores de cisalhamento na interface dos materiais, que servem para unir o aço ao concreto e fazer-lhes trabalhar como uma peça monolítica; necessita de equipamentos/máquinas para transporte e montagem dos elementos que, por serem peças prontas não são facilmente manuseáveis pelos operários. Ainda vale ressaltar que, a viga metálica não será toda recoberta por concreto, e por isso, não estará protegida contra as ações do fogo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O presente tema foi escolhido devido ao crescente cenário da utilização de estruturas mistas nas edificações. Dentre as possibilidades de combinações que comporiam a estrutura mista a ser analisada, foi escolhido a viga metálica, pois como admite Oliveira (2001), devido ao crescente aumento da produção de aço estrutural no Brasil e a busca de uma construção mais racional, o aço, que era utilizado exclusivamente em construções industriais, vem sendo cada vez mais utilizado, tanto em pontes como em edifícios. E a laje treliçada, pois como afirma David (2007), consiste nos tipos de lajes usualmente empregadas nos edifícios de pequeno porte. Assim, sendo ambos os componentes pré-fabricados, a construção torna-se mais industrializada proporcionando mais qualidade, modernidade e agilidade a construção.

Queiroz (2001) discorre que, no Brasil, o sistema construtivo misto vem ganhando espaço e notoriedade entre os projetistas estruturais. Atualmente, pode-se dizer que em edifícios de múltiplos andares, a grande maioria das vigas e das lajes são projetadas como vigas mistas e lajes mistas. Conforme Nardin (2005), o projeto de edifícios em estruturas mistas também ganhou força devido aos avanços tecnológicos na produção de aço e concreto, bem como no desenvolvimento de equipamentos de maior porte que viabilizam a montagem e posicionamento de estruturas mistas.

Assim, é perceptível a relevância dessa pesquisa tendo em vista que é um sistema construtivo em ascensão, porém, ainda pouco estudado e sem muitos critérios normativos para o desenvolvimento de projetos e procedimentos de execução. A combinação laje treliçada e viga metálica é ainda menos discutido, mesmo esses elementos sendo bastante usuais na construção civil.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo teórico sobre vigas mistas compostas por perfis metálicos e lajes treliçadas unidos por conectores de cisalhamento.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever o comportamento mecânico na região da interface da viga metálica com a laje treliçada;
- Verificar a importância do uso de conectores de cisalhamento e determinar como é feita sua colocação;
- Propor o tipo de conector de cisalhamento mais usual para a ligação viga metálica – laje treliçada;
- Ilustrar como deve ser executada este tipo de peça, apresentando as suas características, vantagens e desvantagens.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este referencial teórico discute os conceitos centrais relevantes nesse trabalho, que são: principais características das estruturas mistas aço-concreto e utilização de conectores de cisalhamento na interface entre os materiais. A seguir discute-se os conceitos de estruturas mistas, laje treliçada, viga metálica e conectores mecânicos.

#### 3.1 ESTRUTURAS MISTAS

As estruturas mistas de aço e concreto, incluindo as ligações mistas, são aquelas formadas por componentes de aço e de concreto, armado ou não, trabalhando em conjunto. Uma ligação é denominada mista quando a laje de concreto participa da transmissão de momento fletor de uma viga mista para um pilar ou para outra viga mista no vão adjacente. Quando o momento na viga for negativo, a armadura da laje é tracionada, e quando for positivo, a laje é comprimida (ABNT NBR 8800:2008).

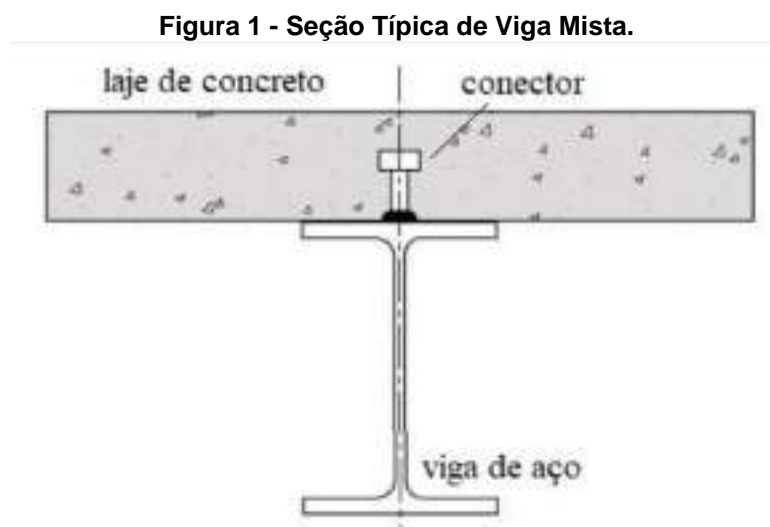
Queiroz (2001) denomina o sistema misto aço-concreto como o sistema híbrido no qual um perfil de aço (laminado, dobrado ou soldado) trabalha em conjunto com o concreto formando um pilar misto, uma viga mista, uma laje mista ou uma ligação mista. Ainda para a mesma referência, a interação entre os materiais é garantida por meios mecânicos, conectores, mossas, ressalto, por atrito ou por simples aderência e repartição de cargas.

Queiroz (2001) afirma que, a construção em sistema misto de aço e concreto é competitiva para estruturas de vãos médios a elevados, caracterizando pela rapidez de execução e pela redução do peso total da estrutura, propiciando assim fundações mais econômicas.

Conforme Nardin (2005), o aumento do uso de estruturas mistas pode ser atribuído a vários fatores, sendo um dos principais a necessidade de grandes áreas livres nos pavimentos. Esta concepção gera implicações estruturais como maiores vãos para vigas e, conseqüentemente, maiores espaçamentos entre pilares e cargas verticais mais elevadas sobre os mesmos

As vigas mistas de aço e concreto, objeto de estudo deste trabalho, são denominadas por Pfeil (2009) como uma viga formada pela associação de um perfil

metálico com uma laje de concreto, sendo os dois elementos ligados por conectores mecânicos. O sistema estrutural resulta na disposição da laje de concreto situada em uma região predominantemente (ou totalmente) comprimida, sobre a viga de aço situada em uma região predominantemente (ou totalmente) tracionada, respectivamente (RAMOS, 2010). É ilustrada na Figura 1 a representação de uma seção transversal típica de uma viga mista do tipo aço-concreto.



**Fonte: Rodrigues (2018).**

A eficiência da viga mista para resistir a esforços de flexão está associada a alguns fatores, tais como: resistência à compressão do concreto e espessura da laje (piso ou cobertura), tipo de aço da viga, existência ou não de escoramento na concretagem das lajes (fase de construção), interação entre viga, laje etc. (Kirchhof, 2004).

Quanto a influência do tipo de apoio adotado para viga, DAVID (2007) discorre que, as vigas mistas podem ser simplesmente apoiadas ou com continuidade nos apoios. As simplesmente apoiadas contribuem para a maior eficiência do sistema misto, pois a viga de aço trabalha predominantemente à tração e a laje de concreto à compressão, embora não seja muitas vezes a solução mais econômica. Kotinda (2006) afirma que, numa viga mista simplesmente apoiada, as tensões normais atuantes ao longo da seção transversal, oriundas dos esforços de flexão, equivalem estaticamente a forças, em geral, de compressão (C) na laje de concreto e tração (T) na viga de aço.

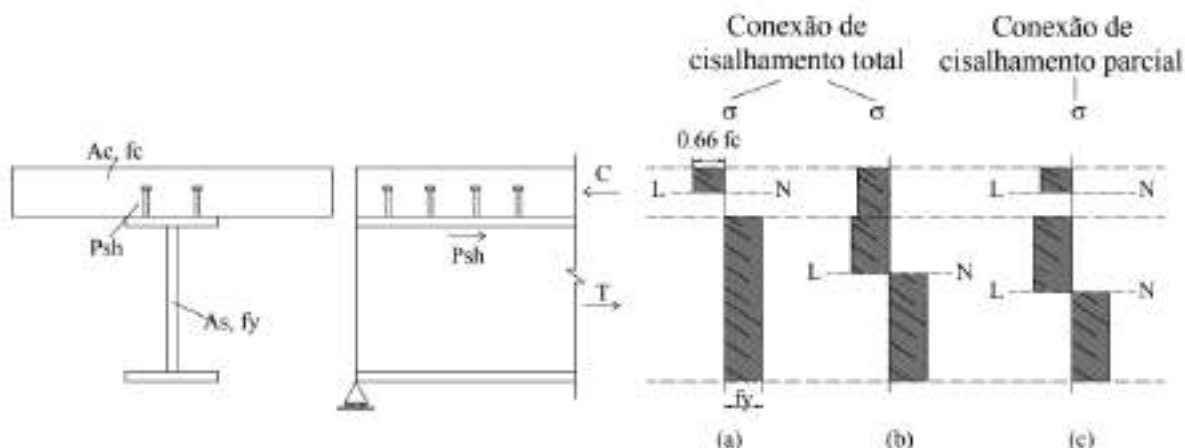
Ao se pensar na região de interface dos materiais e analisando um panorama geral, existem dois fatores significativos no combate aos esforços mecânicos que ocorrem nessa zona de contato, grau de interação e grau de conexão. Kirchhof (2004) os diferencia da seguinte forma: grau de conexão se refere à resistência das seções de aço e concreto e a capacidade de resistência dos conectores de cisalhamento, por meio do equilíbrio longitudinal de forças; já para o grau de interação, o mesmo afirma que, parte da eficiência do comportamento das vigas mistas na interface aço-concreto, ou seja, o tipo de interação existente (nula, completa ou parcial), está diretamente relacionado com o trabalho em conjunto entre ambos materiais.

Resumidamente Kotinda (2006) enfatiza a diferença entre grau de conexão e grau de interação do seguinte modo: enquanto o primeiro se refere à resistência da conexão de cisalhamento da viga mista, o segundo se baseia no escorregamento relativo entre os elementos que a compõe, viga de aço e laje de concreto.

O grau de conexão é observado através de um índice que permite avaliar o grau de interação entre laje e perfil,  $\eta_i$ , este é determinado pela relação entre o somatório das resistências individuais dos conectores situados entre uma seção de momento fletor máximo e a seção adjacente de momento nulo, e a resultante do fluxo de cisalhamento, sendo esse valor igual a menor resistência oferecida pela laje ou pelo perfil. Quando  $\eta_i \geq 1$  a interação é completa e quando  $\eta_i < 1$  a interação é parcial (David, 2007). Para graus de conexão de cisalhamento muito baixos ( $\eta < 0,5$ ), é desprezada a contribuição da laje de concreto na resistência da viga mista, considerando-se que apenas a seção de aço resiste aos esforços de flexão (Kirchhof, 2004).

O grau de conexão pode ser melhor entendido observando os diagramas de deformações apresentados na Figura 2 abaixo que traz uma análise rígido-plástica.

**Figura 2 - Diagrama de deformações em vigas mistas.**



**Fonte: OEHLERS et al, 1997 (apud, Kirchof, 2004. p. 34).**

Kirchof (2004) estabelece que, para o grau de conexão de cisalhamento ser determinada como total:

[...] a seção que está sendo mais solicitada na viga mista atinge sua capacidade máxima à flexão, antes que ocorra a falha na conexão. Nesse caso, a resistência da conexão de cisalhamento ( $P_{sh}$ ) [...], deve ser maior ou igual que a menor das resultantes axiais obtidas nos elementos de concreto ( $P_c = 0,85f_cA_c$ ) e de aço ( $P_s = A_s f_y$ ) (Kirchof, 2004, p. 34).

Portanto, se a resultante das tensões axiais atuantes no concreto for maior que a resultante das tensões axiais atuantes no aço (Figura 2 (a)), o equilíbrio longitudinal de forças será atingido quando os esforços de tração e compressão forem iguais as tensões axiais atuantes no aço. Ao se chegar à estabilidade a linha neutra se encontrará na laje de concreto, o que caracteriza um grau de conexão total.

Se o oposto acontecer, ou seja, a resultante das tensões axiais atuantes no aço for maior que a resultante das tensões axiais atuantes no concreto (Figura 2 (b)), o equilíbrio longitudinal de forças será atingido quando os esforços de compressão e tração forem iguais as tensões axiais atuantes no concreto. Ao se chegar à estabilidade a linha neutra se encontrará na alma da viga metálica o que caracteriza um grau de conexão total.

Já para o grau de conexão de cisalhamento ser determinado como parcial, Kirchof (2004) estabelece que:

[...] quando existir um número relativamente pequeno de conectores (quantidade menor que a mínima estabelecida para se ter conexão completa)

tal que a resistência da conexão de cisalhamento ( $P_{sh}$ ) é menor que ambas as resultantes axiais das seções de aço ( $P_s = A_s f_y$ ) e de concreto ( $P_c = 0,85 f_c A_c$ ) [...] (Kirchhof, 2004, p. 34).

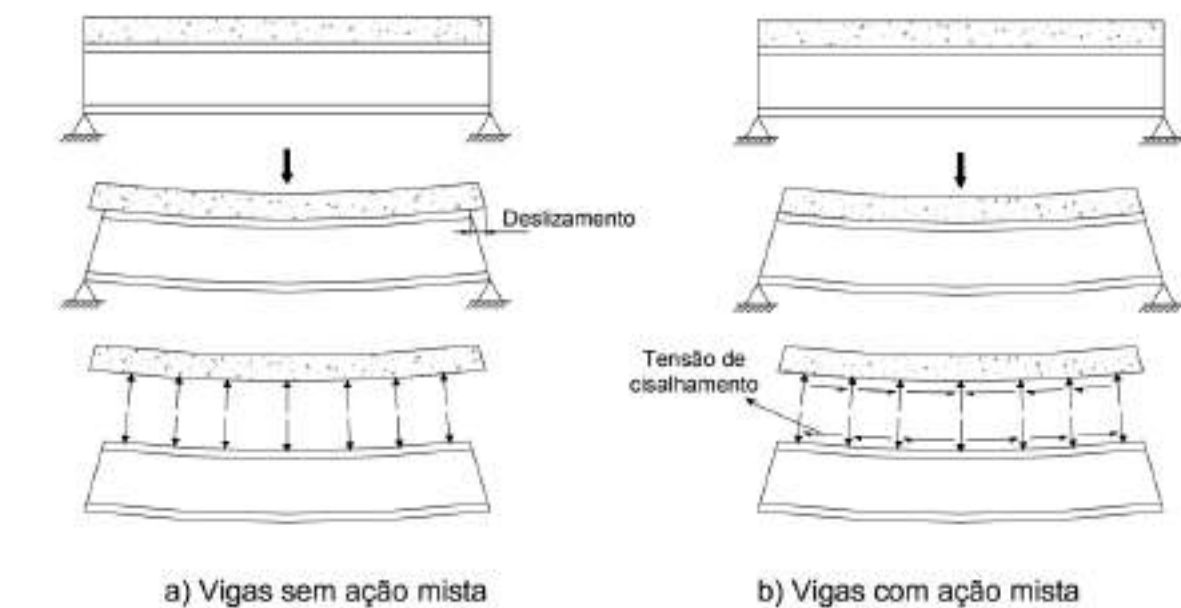
Assim, se resistência da conexão de cisalhamento (gerada pelo conector) for menor que a resultante das tensões axiais atuantes no aço e no concreto (Figura 2 (c)), o equilíbrio longitudinal de forças será atingido quando os esforços de compressão e tração forem iguais a resistência da conexão do cisalhamento. Ao se obter a estabilidade haverá duas linhas neutras, uma se encontrará na alma da viga metálica e a outra na laje de concreto, que caracteriza um grau de conexão parcial.

Já sobre o grau de interação que ocorre entre os elementos da viga mista, David (2007) define:

Consiste na capacidade total da conexão de cisalhamento em relação as máximas resultantes de tensão que podem ser mobilizadas pela viga de aço ou pela laje de concreto. O grau de interação, completa ou parcial, influencia a rigidez e a resistência da viga mista e é função da resistência e espaçamento dos conectores [...] (David, 2007, p. 24).

Uma melhor explanação sobre o comportamento do grau de interação é feita baseando-se Figura 3.

**Figura 3 - Vigas Mistas Fletidas.**



Fonte: David, 2007.

Na Figura 3 (a), pode ser analisado que, na ausência de conectores de cisalhamento e desprezando-se o atrito na região de interface dos materiais, ao serem submetidos a esforços mecânicos não há a ação de forças restringindo a deformação relativa entre laje de concreto e viga de aço, assim, os elementos reagem deformando-se de forma independente um do outro de acordo com sua rigidez e com suas características físico-químicas. Essa situação provoca um deslizamento relativo entre os elementos, caracterizando um comportamento autônomo das peças. Nesse caso, ocorre a interação nula e os dois elementos trabalham de forma independente, cada um resistindo a uma parcela dos esforços de flexão, o concreto resiste aos esforços de compressão e a viga metálica aos esforços de tração, sem que haja um compartilhamento.

Em contrapartida, na Figura 3 (b), analisa-se que, com a utilização de conectores de cisalhamento, o aço e o concreto passam a estar interligados. Considerando ainda que o conector tenha resistência suficiente para suportar o fluxo de cisalhamento na interface, os elementos tenderão a se deformar de forma a propagar esforços mecânicos de um para o outro, assim, o concreto absorve uma parcela dos esforços de tração e a viga metálica absorve uma parcela dos esforços de compressão. Ocorrendo essa transmissão a peça passa a se comportar como um material monolítico. Deste modo, esta explanação é um exemplo de grau de interação completa, onde, havendo uma ligação perfeita entre a viga de aço e a laje de concreto pelo conector, não existirá um escorregamento relativo entre as peças e assim as seções planas permanecerão planas (hipótese de Bernoulli) e o diagrama de deformações é considerado contínuo.

Já no grau de interação parcial, que ocorre devido o conector não suportar completamente as tensões na interface dos elementos, ele deforma-se, permitindo um deslizamento relativo entre as peças (Figura 4), violando a planicidade das seções, assim, como a hipótese de Bernoulli não é atendida nesse caso espera-se uma descontinuidade no diagrama de deformações.

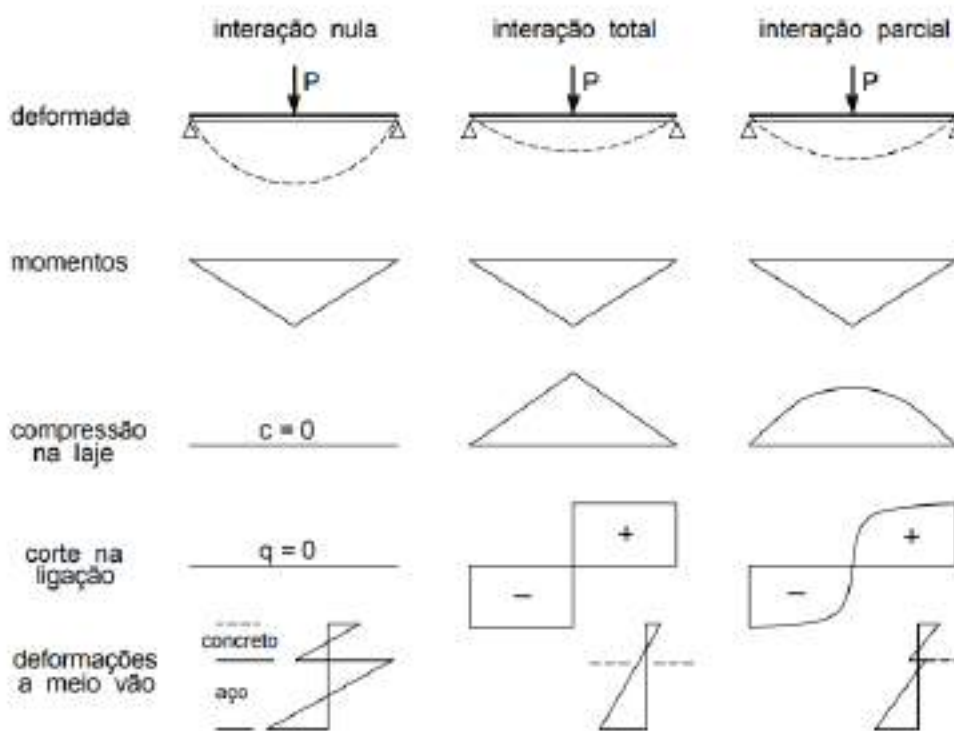
**Figura 4 - Seção com deslizamento relativo.**



Fonte: OEHLERS, 1995 (apud, Sales, 2014. p. 24)

Os diagramas gerados pelos esforços mecânicos nos três tipos de grau de interação (nulo, parcial e total) estão apresentados na Figura 5.

**Figura 5 - Diagramas de esforços mecânicos para cada grau de interação.**



Fonte: Malite, 1990.

Para explicar o que ocorre nos diagramas apresentados na Figura 5, Kirchhof (2004) faz as seguintes atribuições:

[...] admite-se Interação nula quando a seção de aço é projetada isoladamente para suportar, por exemplo, o carregamento do pavimento mais o peso próprio da laje. Como não existe qualquer ligação ou atrito na interface, os elementos comportam-se independentemente, surgindo para laje de concreto e viga de aço linhas neutras também independentes. Deste

modo, a superfície inferior da laje é livre para deslizar sobre a mesa superior da seção de aço, permitindo assim, consideráveis escorregamentos entre ambos os materiais.

Por outro lado, a Interação completa ou total é considerada quando se admite inexistência de escorregamento longitudinal relativo e afastamento vertical entre viga e laje. Deste modo, considera-se que exista uma ligação perfeita entre os elementos estruturais viga de aço e laje de concreto, de tal forma a se deformarem como um único elemento. Por esta razão, pode-se assumir a hipótese de que as seções planas permanecem planas e a distribuição de deformações apresenta apenas uma linha neutra.

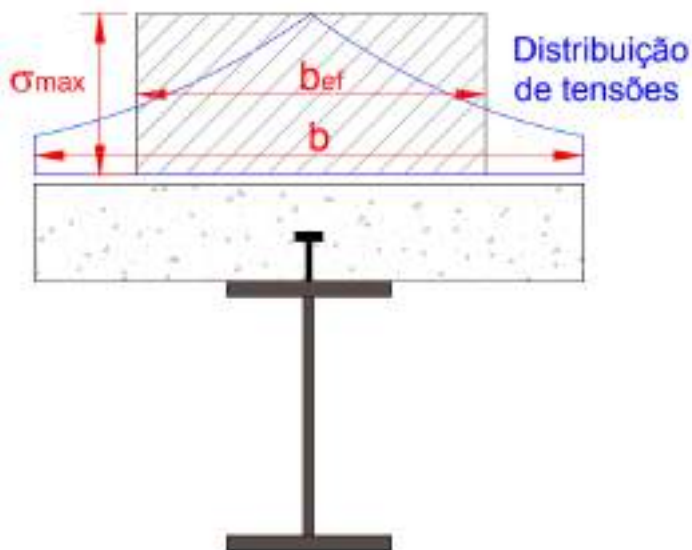
Quando for admitido escorregamento relativo entre as superfícies aço e concreto, implicando em uma descontinuidade no diagrama de deformações, o termo Interação parcial pode ser considerado (Kirchhof, 2004, p. 36 e 37).

O conhecimento dessas hipóteses é importante para o dimensionamento da viga mista pois do tipo de ligação entre o aço e o concreto vai resultar a distribuição de tensão na seção e também do fluxo de cisalhamento na conexão, bem como a deformação da viga (Oliveira, 2001).

As vigas mistas de aço e concreto apresentam diversas vantagens nas regiões de momento positivo em relação às vigas de aço isoladas, uma vez que, a flambagem local da mesa e da alma (FLM e FLA), assim como a flambagem lateral com torção (FLT), são impedidas ou minimizadas (Ferreira, Souza, Machado, 2017).

Na análise de vigas mistas, assume-se que as tensões têm uma distribuição uniforme ao longo da largura da laje, porém isso não ocorre, na verdade, as tensões são máximas sobre as vigas e decrescem à medida que vão se distanciando (David, 2007), como pode ser visto na Figura 6.

**Figura 6 - Distribuição de Tensões em Viga Mista.**



Fonte: David, 2007.



Dos tipos de perfil de viga metálica disponíveis no mercado, o mais comumente utilizado na composição de vigas mistas é a do modelo de perfis tipo “I” soldado, laminado ou treliçado. Quanto as tipologias das lajes de concreto, geralmente associa-se o perfil metálico com as do tipo maciça, mista (maciça com forma de aço incorporada) e pré-moldadas (vigotas treliçadas em concreto e um material inerte para preenchimento). Com relação ao conector mecânico, geralmente é utilizado o tipo pino com cabeça (stud). Essas associações podem ser vistas na Figura 7.

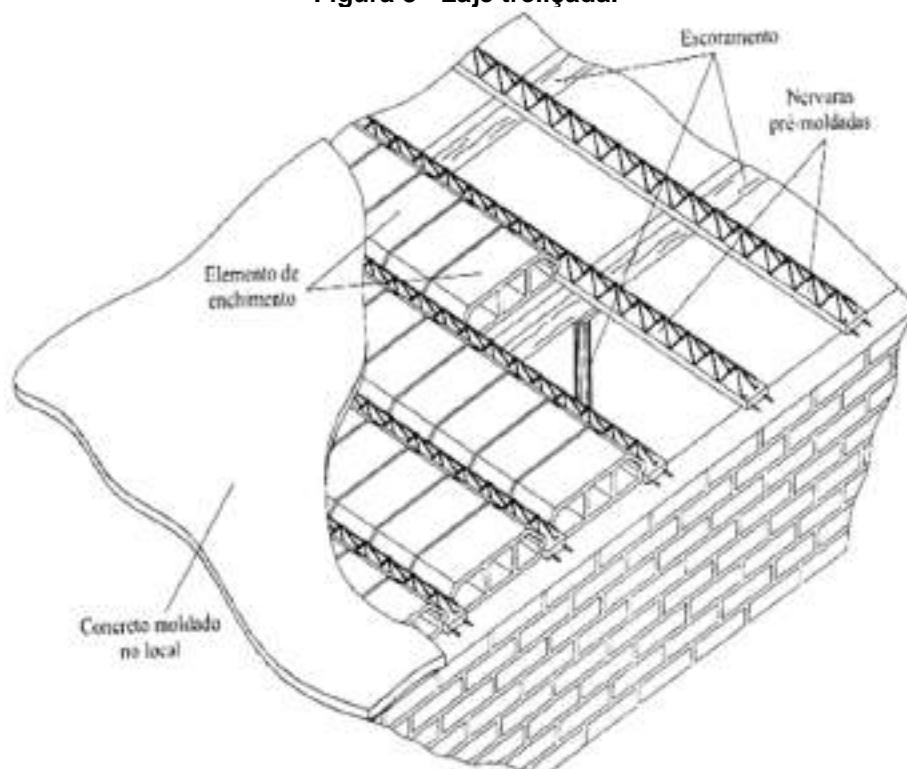


**Fonte: Tineo, 2016 (adaptado).**

### 3.2 LAJE TRELIÇADA

Por critérios geométricos, as lajes são classificadas como elementos de placa, pois sua largura e seu comprimento são muito maiores que sua espessura. A NBR 6118 (ABNT,2014), denomina as placas/lajes como elementos de superfície plana, sujeitos principalmente a ações normais a seu plano.

Dentre os tipos de laje existentes, a que será utilizada nesta análise será a laje treliçada (Figura 8). A norma que rege suas premissas é a NBR 14860-1 (ABNT,2002), intitulada Laje pré-fabricada - Pré-laje – Requisitos - Parte 1: Lajes unidirecionais. Esta classifica as lajes treliçadas como pré-lajes e as define como placas com espessura de 3,0 cm a 5,0 cm e larguras padronizadas. Constituídas por concreto estrutural, executadas industrialmente fora do local de utilização definitivo da estrutura, ou mesmo em canteiros de obra, sob rigorosas condições de controle de qualidade. Englobam total ou parcialmente a armadura inferior de tração, integrando a seção de concreto da nervura.

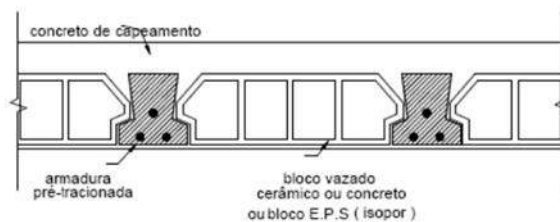
**Figura 8 - Laje treliçada.**

Fonte: EL DEBS, 2000 (apud, Cunha, 2012. p. 6).

As lajes formadas por vigotas são muito empregadas em construções de pequeno e médio porte no Brasil. Principalmente as vigotas com armação treliçada (Cunha, 2012). As vigotas pré-moldadas, são geralmente encontradas em concreto armado com seção T invertida (conhecida como volterrana), em concreto protendido e em forma de treliça acoplada em uma base de concreto. Essas tipologias podem ser vistas na Figura 9.

**Figura 9 - Vigota pré-moldadas.**

vigota de concreto armado comum (VC)



vigota de concreto armado protendido (VP)



vigota com armadura treliçada (VT)

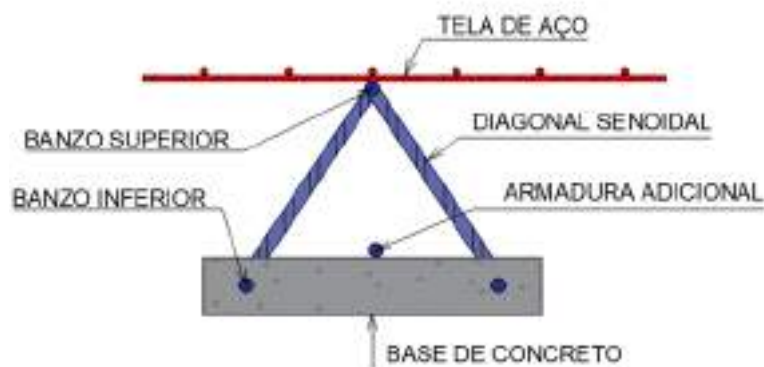
**Fonte: Droppa JR., 1999.**

Nardin (2008), determina os componentes da laje treliçada:

O principal elemento constitutivo das lajes treliçadas são as “vigotas treliçadas”, elementos estruturais pré-moldados, compostos por uma armação chamada treliça nervurada e uma sapata em concreto, de pequena espessura. [...] Ainda compõe a laje treliçada os elementos de enchimento (EPS ou lajota cerâmica), a tela soldada e a armadura adicional, determinada em cada caso pelo fabricante da vigota treliçada (NARDIN, 2008, p. 25 e 26).

As armaduras da laje treliçada encontram-se essencialmente na vigota treliçada (Figura 10), no entanto, se os banzos inferiores não forem suficientes e capazes de resistir aos esforços de tração, pode-se adicionar mais barras longitudinais de aço (definido pelo projetista) na base de concreto durante a fabricação da vigota treliçada ou essas barras podem ser adicionada durante a execução da laje, além da utilização de tela de aço que tem a função de evitar fissuras no capeamento de concreto.

**Figura 10 - Armadura da Vigota Trelaçada.**

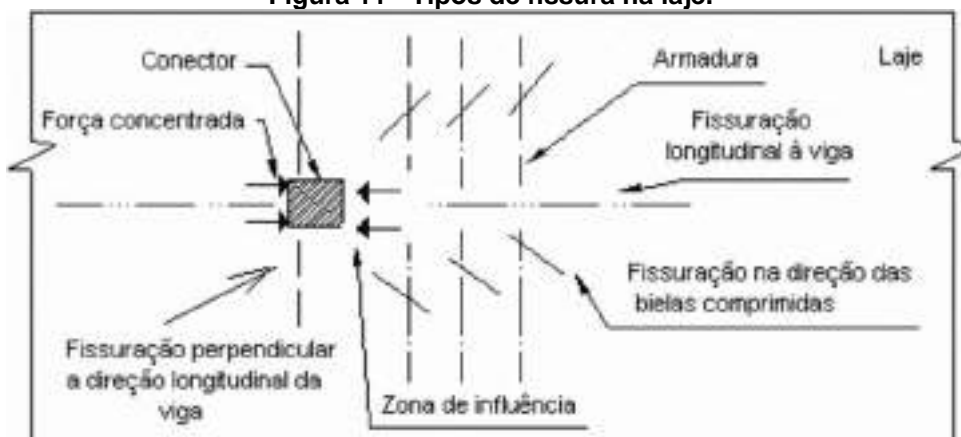


Fonte: Autor.

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2007) as lajes devem ser adequadamente armadas para resistir a todas as solicitações de cálculo e para trabalhar como parte integrante da viga mista [...]. A fissuração da laje, causada por cisalhamento, na região adjacente ao perfil de aço, paralelamente a este, deve ser controlada por armadura adicional, transversal ao perfil, a não ser que se demonstre que as armaduras necessárias para outros fins, devidamente ancoradas, sejam suficientes para esta finalidade.

Com a ruptura dos conectores de cisalhamento e até mesmo com a sua deformação surgem fissuras nas lajes (Figura 11), associadas a este fator que representa uma diminuição da resistência e rigidez do elemento estrutural. Para tanto, David (2007) menciona que quanto maior for a taxa de armadura transversal na laje de concreto (dentro de uma quantidade tolerável), maior será a resistência última à flexão alcançada pela viga mista.

**Figura 11 - Tipos de fissura na laje.**



Fonte: Tristão, 2002.

Como solução para a problemática David (2007) recomenda que:

Sejam colocadas armaduras transversais com o objetivo de se limitar a propagação da fissura longitudinal na região onde se encontram as linhas de conectores de cisalhamento. Esta armadura deverá ser uniformemente distribuída ao longo do vão da viga, posicionada na face inferior da laje e calculadas de acordo com o modelo de treliça de Morsh (David, 2007, p. 57).

Quanto as vantagens estruturais deste tipo de laje, Carvalho e Pinheiro (2009), discorrem:

Para vãos de grandes dimensões, as lajes maciças geralmente apresentam, pelo menos no ELU, uma pequena região de concreto comprimido e, portanto, há muito concreto abaixo da linha neutra que está tracionado, o que nesta situação, não colabora na resistência a flexão; assim, nada mais racional do que substituir uma parte desse concreto por um material inerte (quase sempre mais leve e mais barato que o concreto) ou simplesmente moldar com fôrma uma região tracionada composta apenas por nervuras (CARVALHO E PINHEIRO, 2009, p. 14 e 15).

### 3.3 VIGA METÁLICA

Por suas dimensões características, as vigas são classificadas como elementos de barras, pois seu comprimento longitudinal é muito maior que as dimensões da sua seção transversal (largura e espessura). A NBR 6118 (ABNT, 2014), denomina as vigas como elementos lineares em que a flexão é preponderante. Nas estruturas mistas de aço e concreto, o aço é empregado nos perfis, nas barras das armaduras, nos conectores de cisalhamento, nos parafusos e nas formas metálicas incorporadas ao concreto em lajes mistas (FUZIHARA, 2006).

A construção metálica vem experimentando um crescente aumento de interesse por parte das pessoas e empresas envolvidas com a construção predial de uma maneira geral. (Oliveira, 2001). Devido à pequena gama de perfis laminados e ao custo relativamente elevado dos perfis soldados, o emprego de perfis formados a frio em edifícios de pequeno porte (até quatro ou cinco pavimentos) tem representado uma solução economicamente viável e, portanto, bem aceita no ramo da construção metálica (David, 2007).

Os tipos de perfis metálicos mais utilizados no mercado são (definições feitas por Pfeil (2009)):

- Perfis laminados: fabricados em laminadores que, em sucessivos passes, dão ao aço preaquecido a seção desejada.
- Perfis formados a frio: as chapas metálicas de aços dúcteis podem ser dobradas a frio, transformando-se em perfis de chapas dobradas. A dobragem das chapas é feita em prensas especiais nas quais há gabaritos que limitam os raios internos de dobragem a certos valores mínimos, especificados para impedir a fissuração do aço na dobra.
- Perfis soldados: os perfis são formados pela associação de chapas ou de perfis laminados simples, sendo a ligação, em geral, soldada.

A utilização de vigas mistas em estruturas formadas por perfis laminados e soldados já é bem difundida e várias são as normas que prescrevem sua forma de dimensionamento e limitações de uso. Tratando-se de perfis formados a frio, poucas informações existem a respeito de sua utilização em vigas mistas (David, 2007).

Mesmo com a deficiência de informações sobre como projetar estruturas com perfis formados a frio, Oliveira (2001) menciona que:

Devido ao fato da falta de perfis laminados e ao custo dos perfis soldados, os perfis formados a frio estão sendo cada vez mais utilizados e já podem ser encontrados no mercado em diversas formas e dimensões padronizadas. Entretanto, uma das grandes vantagens destes perfis é que eles conferem ao projetista uma grande liberdade de escolha, seja no formato da seção transversal, seja nas suas dimensões (Oliveira, 2001, p. 6).

Os perfis de aço são fabricados em diversos tipos e dimensões, como pode ser visto nas Figuras 12 a 15.

Figura 12 - Perfil I.



Fonte: HIPERFERRO, acessado em 19-06-2021.

Figura 13 - Perfil H.



Fonte: ALDIFER, acessado em 19-06-2021.

Figura 14 - Perfil U.



Fonte: Casa do Serralheiro, acessado em 19-06-2021.

Figura 15 - Perfil T.



Fonte: GALVAMINAS, acessado em 19-06-2021.

No caso de o componente de aço da viga mista ser um perfil I, a viga recebe a denominação de viga mista de aço e concreto de alma cheia (ABNT NBR 8800:2008). Como é mencionado pela mesma referência, as vigas mistas de aço e concreto de alma cheia podem ser biapoiadas, contínuas ou semicontínuas. As biapoiadas são aquelas em que as ligações nos apoios podem ser consideradas como rótulas. As contínuas são aquelas em que o perfil de aço e a armadura da laje tem continuidade total nos apoios internos. As semicontínuas são aquelas em que o perfil de aço não tem continuidade total nos apoios internos, ou seja, que possuem ligação de resistência parcial (ABNT NBR 8800:2008).

David (2007), afirma que as vigas simplesmente apoiadas contribuem para a maior eficiência do sistema misto, pois a viga de aço trabalha predominantemente a tração e a laje de concreto a compressão.

### 3.4 CONECTORES MECÂNICOS

O comportamento de vigas mistas depende da ação conjunta entre a viga de aço e a laje de concreto. Como a aderência natural entre os dois materiais e as forças

de atrito presentes não são, normalmente, consideradas no cálculo, torna-se necessário o uso de conectores de cisalhamento para transmitir o cisalhamento na interface (DAVID, 2007).

Os conectores são dispositivos mecânicos que conectam as partes das estruturas mistas, como aço e concreto, com a finalidade de absorver as tensões de cisalhamento que ocorrem na interação entre as interfaces das peças (SALES, 2014). Nota-se que a fibra de concreto adjacente à interface aço-concreto tende a se expandir, enquanto a fibra de aço adjacente à mesma interface tende a se contrair. Essa deformação relativa faz com que os conectores se deformem, aplicando uma força sobre o concreto em direção ao meio do vão. (Kotinda, 2006).

Para Pfeil (2009), os conectores devem garantir o trabalho conjunto das seções, onde, o conector absorve os esforços cisalhantes horizontais que se desenvolvem na direção longitudinal na interface da laje com a mesa superior da seção de aço e ainda impede a separação física desses componentes. De modo que o conjunto trabalhe para resistir a esforços de flexão em torno do eixo perpendicular ao plano médio da alma. (Kirchhof, 2004). Percebe-se então que os conectores de cisalhamento têm como função não só transferir forças de cisalhamento longitudinais na interface entre laje e viga, mas também impedir a separação vertical desses elementos (Kotinda, 2006).

Desta forma, a resistência e rigidez do material do conector de cisalhamento tem enorme influência no comportamento de uma viga mista (TRISTÃO, 2002). Conforme Sales (2014), a força imposta pelo movimento relativo entre a laje e a viga é equilibrada pela força que surge na base do conector. No entanto, David (2001) explica que, em vigas mistas os conectores são solicitados indiretamente, sendo que a força no conector não é proporcional à força aplicada à viga, pois depende da rigidez dos vários componentes.

Com o desenvolvimento dos processos de soldagem tornou-se viável a ligação da laje de concreto por meio de conectores soldados as vigas de aço (FUZIHARA, 2006). Especialmente projetado para funcionar como um eletrodo de solda por arco elétrico, o conector do tipo pino com cabeça é instalado sobre a mesa superior da viga de aço, por meio de uma pistola como pode ser visto na Figura 16. Este processo de soldagem resulta em uma solda de penetração total, podendo o conector ser considerado engastado na viga de aço.



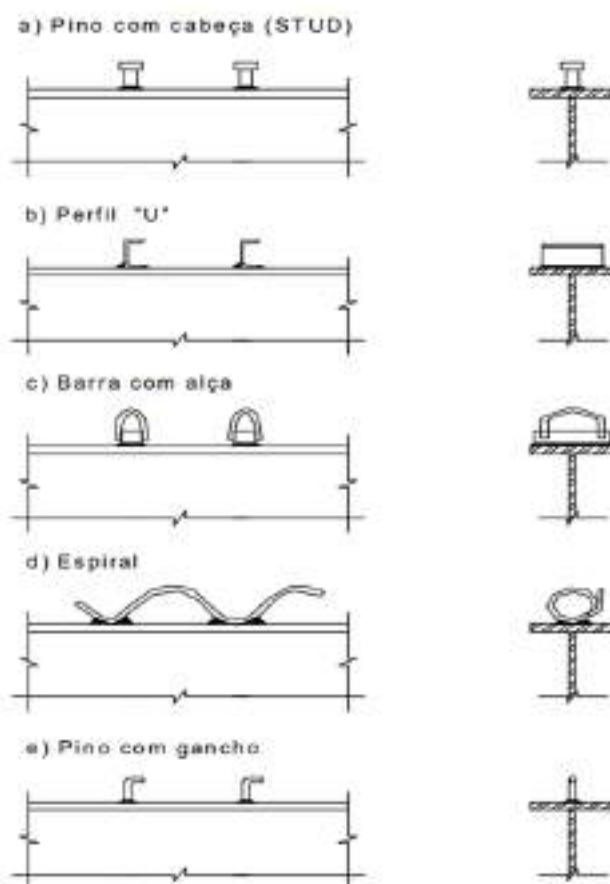
**Figura 16 - Processo de soldagem do conector.**



Fonte: Cruz, et. al, 2006 (apud, Ferreira 2017. p. 220).

Os conectores mecânicos de cisalhamento possuem formas variadas, os modelos mais usuais são: pino com cabeça (STUD), perfil U, barra com alça, espiral e pino com gancho. Estes podem ser observado na Figura 17. Ambos são soldados na mesa do perfil metálico e completamente embutidos em concreto.

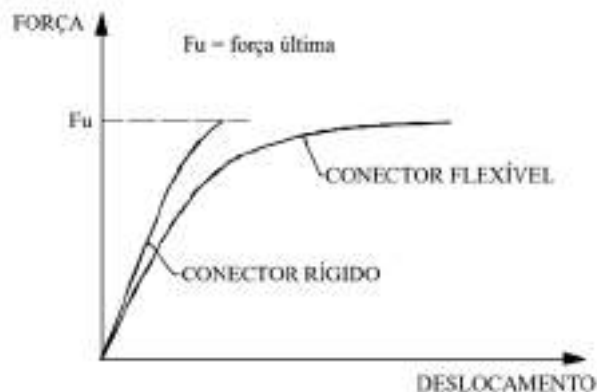
**Figura 17 - Modelos de Conectores.**



Fonte: Malite, 1990.

Os conectores, geralmente, são classificados como flexíveis ou rígidos. Para Tristão (2002), ambos os tipos são definidos por meio da relação entre força no conector e o deslocamento relativo aço-concreto, que surge em resposta ao fluxo de cisalhamento longitudinal gerado pela transferência de força entre laje de concreto e perfil de aço (Figura 18).

**Figura 18 - Relação Força x Deslocamentos em conectores.**



Fonte: Alva, 2000.

Analisando o gráfico da Figura 19 é notório que os conectores flexíveis apresentam uma menor relação força versus deslocamento, ou seja, são mais dúcteis. Entende-se aqui que ductilidade é a capacidade de deslizamento do conector após ter atingido sua resistência máxima. No regime elástico a deformação dos conectores quase não afeta o comportamento da estrutura mista, mas após o escoamento, o conector flexível praticamente perde sua funcionalidade.

Outro fato importante que deve ser salientado é que:

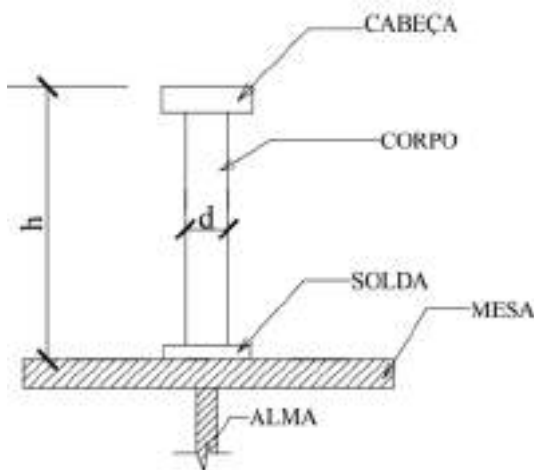
[...] sob carregamento crescente, um conector flexível, próximo a atingir a sua resistência máxima, pode continuar a deformar-se, sem ruptura, permitindo que conectores vizinhos absorvam, por sua vez, maior força de cisalhamento e atinjam também a sua capacidade total, num processo de uniformização da resistência da conexão e, portanto, uma melhor exploração da eficiência da conexão. Esta característica permite espaçar igualmente este tipo de conectores, sem diminuir a resistência máxima da conexão. (Oliveira, 2001, p. 10 e 11).

Os ensaios de cisalhamento direto mostraram que o deslizamento permitido pelo conector tem uma fase retornável e outra não. Essa fase não retornável, deslizamento residual, permanece baixa até que a máxima tensão no conector

alcance a tensão de escoamento do aço. Após ter atingido esta tensão, o deslizamento residual aumenta rapidamente (DAVID, 2007).

Conforme mencionado SALES (2014), os conectores flexíveis são os mais utilizados pela facilidade de realização de solda automática, bem como excelente comportamento estrutural. Kotinda (2006) afirma que, o pino com cabeça, mais conhecido como “stud bolt” é o conector de cisalhamento mais utilizado no contexto mundial (Figura 19). No Brasil, este tipo de conector divide espaço com os perfis U laminados. Entre estes, Kirchhof (2006) declara que, os conectores tipo pino com cabeça (stud) são os mais utilizados por apresentarem a mesma resistência em todas as direções, bem como uma maior facilidade de execução.

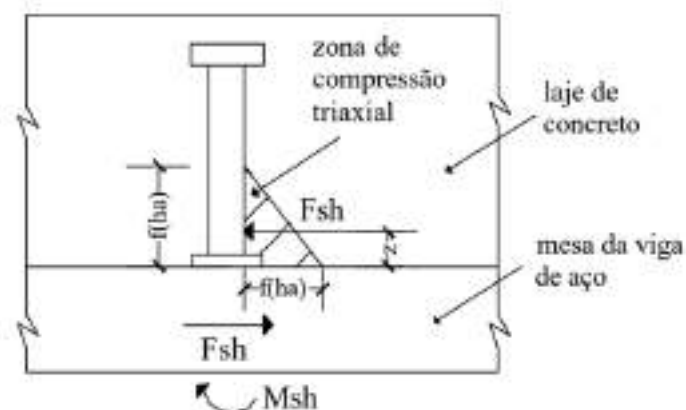
**Figura 19 - Conector pino com cabeça (Stud).**



**Fonte: Kirchhof, 2006.**

Baseando-se no que foi explanado por David (2003) e Sales (2014) sobre as tensões atuantes no conector de cisalhamento do tipo pino com cabeça, e ainda, analisando a Figura 20, constata-se que, no fuste próximo a solda do conector existe uma região circundante de compressão do concreto chamada de zona de compressão triaxial. Nela ocorre as tensões de cisalhamento, que atuam a uma certa distância da mesa da viga metálica (excentricidade), e assim, a combinação da força com a excentricidade gera um momento Fletor na base do conector.

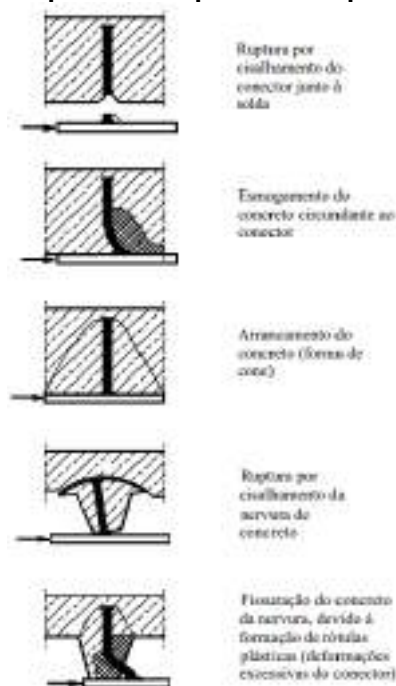
Figura 20 - Esforços mecânicos atuantes no conector.



Fonte: Tristão, 2002.

Estando o conector sujeito a tensões de cisalhamento e flexão, se este não tiver resistência suficiente para combater os esforços mecânicos solicitantes ou se não for instalado com uma solda contínua bem executada, o conector deforma-se rotacionando a cabeça do pino gerando uma falha na ligação da estrutura mista e por consequência ocasiona fissuras no concreto na extensão adjacente ao perfil de aço e permite um deslocamento relativo entre a laje de concreto e a viga metálica. Na Figura 21 é demonstrado outros tipos de colapso que podem ocorrer no conector tipo pino com cabeça ao sofrer ações de cisalhamento.

Figura 21 - Tipos de colapso sofrido pelo conector.



Fonte: Tristão, 2002.

## 4 METODOLOGIA

O método utilizado para desenvolvimento deste trabalho consistiu-se em pesquisas para fundamentação teórica da conceitualização das estruturas. O levantamento bibliográfico para embasamento é composto por livros, normas técnicas, monografias, dissertações e artigos, referentes a temática de estruturas mistas, estruturas de concreto e estruturas metálicas. Estes referem-se às estruturas de aço, estruturas de concreto e às estruturas mistas.

Este estudo será dividido em três etapas, sendo que na primeira, será realizado pesquisas para o levantamento bibliográfico. Nesta etapa, o intuito é coletar os trabalhos científicos desenvolvidos recentemente sobre o tema proposto. Os trabalhos serão de estruturas variadas. Tem-se por intuito priorizar as escritas de autores especialistas na temática de estruturas mistas e desenvolvedores de pesquisa para melhoramento do desempenho das mesmas.

Na segunda etapa, inicia-se a produção da escrita do trabalho, que consiste em introduzir o tema, relatando historicamente o seu surgimento, em âmbito mundial e nacional, apresentar suas vantagens e desvantagens, além de justificar a relevância do estudo realizado. Em seguida, estabelece-se os objetivos que servirão de norte para o desenvolvimento do trabalho, com o propósito de que este não fique abrangente e disperso. Por conseguinte, será realizado por meio de uma descrição, as definições e caracterização detalhada das estruturas mistas, assim como, de cada um dos seus elementos constituintes. Desta forma, cada elemento será analisado quanto ao seu comportamento isoladamente e em conjunto. Essas classificações serão fundamentadas na visão de diferentes autores e normas.

Na terceira etapa, será elaborada uma discussão sobre os conceitos, características e dados coletados e previamente expostos, a fim de determinar o comportamento das estruturas mistas e compreender a melhor forma de utilizá-las. Nas considerações finais, o trabalho de pesquisa deve ser justificável, embasado no conteúdo apresentado. Ao fim da escrita, será analisado se o estudo desenvolvido atende as especificações dos objetivos e traz algo de relevante para a área das estruturas mista e conseqüentemente para a sociedade.

## 5 VIGA MISTA DE PERFIS METÁLICOS ASSOCIADOS A LAJES TRELIÇADAS

O presente trabalho tratar-se-á da análise teórica sobre a temática da utilização de estruturas mistas de aço e concreto, mais especificamente da associação entre os sistemas de viga em perfil metálico, laje pré-moldada e conectores mecânicos flexíveis. A escolha desses constituintes se deu pelas suas características físico-químicas, comportamentos mecânicos e vantagens construtivas abordadas no desenvolvimento desta análise.

Por tratar-se de uma pesquisa conceitual, os resultados aqui apresentados serão baseados nas conclusões obtidas por outros autores, que realizaram ensaios utilizando os mesmos componentes propostos. Vale ressaltar que a proposta deste trabalho não é dimensionar uma estrutura mista, mas, explanar seu comportamento e definir o melhor arranjo das peças.

Sobre os autores que serviram de referência para aquisição de dados sobre a dedução dos resultados dos ensaios, são eles: Ferreira, Souza e Machados, em que desenvolveram um estudo de caso de natureza aplicada, publicada em 2017, onde o pressuposto deste trabalho foi um estudo comparativo de dois sistemas de viga mista com perfil em aço, no qual foi dimensionado e comparado o sistema de viga mista com lajes de forma em aço incorporada e viga mista com laje treliçada, ambos em construção escorada e não escorada, levantando os principais aspectos de eficiência estrutural bem como, aspectos econômicos para utilização em grandes vãos, aplicados em uma edificação de um pavimento de uso comercial (elaborado pelos autores). Para o procedimento foram utilizadas vigas em perfis soldados e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça com grau de interação total.

Acerca da delimitação das peças, consideraram o concreto com resistência característica à compressão,  $f_{ck}$  igual a 25 Mpa e foi utilizada para os perfis metálico das vigas a classe 350 no aço. Para o dimensionamento dos elementos (desenvolvido conforme prescrições da ABNT NBR 8800:2008) foram utilizadas planilhas de cálculo elaboradas no Microsoft Office Excel pelo Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA) em parceria com a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). As condições de carregamento previamente definidas para o dimensionamento da estrutura foram as seguintes: Revestimento de 1,00 kN/m<sup>2</sup>, sobrecarga de uso e ocupação de 3,00 kN/m<sup>2</sup>, carga de alvenaria de 6,92 kN/m sobre as vigas. O resultado do dimensionamento está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado do dimensionamento estrutural.

Combinações para dimensionamento		Espessura da laje (mm)	Seção do perfil escolhido (mm x kg/m)	Peso próprio do perfil (kN/m)	Quantidade de conectores (vão)
Laje com Forma de Aço Incorporada	Vigas de Extremidades V1 e V3 escoradas	120	650x66,3	0,66	116
	Vigas de Intermediária V2 escorada	120	650x67,0	0,67	86
	Vigas de Extremidades V1 e V3 sem escoramento	120	650x72,2	0,72	116
	Vigas de Intermediária V2 sem escoramento	120	650x99,2	0,99	86
Laje Treliçada (preenchimento com EPS)	Vigas de Extremidades V1 e V3 escoradas	120	650x63,5	0,64	44
	Vigas de Intermediária V2 escorada	120	650x66,0	0,66	44
	Vigas de Extremidades V1 e V3 sem escoramento	120	650x67,0	0,67	44
	Vigas de Intermediária V2 sem escoramento	120	650x80,9	0,81	44

Fonte: Ferreira, Souza e Machados, 2017.

Na Tabela 2 é expresso o consumo de aço para a estrutura dimensionada.

Tabela 2 - Consumo de aço da estrutura.

Combinações para dimensionamento	Seção do perfil (mm x kg/m)	Tamanho do perfil (m)	Quant. de perfil	Consumo de aço (kg)			Total	
				Perfil	Conector	Total		
Laje com Forma de Aço Incorporada	Vigas de Extremidades V1 e V3 escoradas	650x66,3	15,00	2,00	1.989,00	40,60	2.029,60	3.071,58
	Vigas de Intermediária V2 escorada	650x67,0	15,00	1,00	1.005,00	36,98	1.041,98	
	Vigas de Extremidades V1 e V3 sem escoramento	650x72,2	15,00	2,00	2.166,00	40,60	2.206,60	3.731,58
	Vigas de Intermediária V2 sem escoramento	650x99,2	15,00	1,00	1.488,00	36,98	1.524,98	
Laje Treliçada (preenchimento com EPS)	Vigas de Extremidades V1 e V3 escoradas	650x63,5	15,00	2,00	1.905,00	15,40	1.920,00	2.925,80
	Vigas de Intermediária V2 escorada	650x66,0	15,00	1,00	990,00	15,40	1.005,40	
	Vigas de Extremidades V1 e V3 sem escoramento	650x67,0	15,00	2,00	2.010,00	15,40	2.040,80	3.269,70
	Vigas de Intermediária V2 sem escoramento	650x80,9	15,00	1,00	1.213,50	15,40	1.228,90	

Fonte: Ferreira, Souza e Machados, 2017.

Pela Tabela 2 Ferreira, Souza e Machados (2017) denotaram que:

O dimensionamento das vigas mistas, para construção não escorada, resultou em seções de perfis em aço mais pesadas que a solução com construção escorada. Segundo a NBR 8800:2008 isso se deve ao fato do componente de aço, por si só, ter que possuir resistência de cálculo adequada para suportar todas as ações de cálculo aplicadas antes de o concreto atingir uma resistência igual a 75 % da resistência característica à compressão especificada (Ferreira, Souza e Machados, 2017, p. 13).

Foi evidenciado ainda que, para uma mesma altura de laje acabada, a solução com laje treliçada com preenchimento de EPS é mais leve - em comparação com a laje de aço incorporada e levando em consideração o consumo de aço - tanto para a situação com escoras quanto para a situação sem escoras. E proporcionou ainda uma quantidade menor de conectores de cisalhamento. Para o sistema de laje escorada a diferença entre o consumo de aço foi de 2,2% e para o sistema de laje não escorada, essa diferença foi de 6,6%. A priori a diferença do consumo de aço para o uso ou não de escoras não é significativo, e assim, pode-se concluir que quanto maior o carregamento das vigas mais expressiva será a economia no peso do sistema misto com laje treliçada.

Além da referência citada acima, também serão utilizados neste trabalho os estudos desenvolvidos por Daniela David, que em seu trabalho de Tese publicado em 2007, desenvolveu uma investigação teórica e experimental sobre os conectores de cisalhamento flexíveis de perfil U formados a frio e sobre vigas mistas constituídas por perfis formados a frio (seção I e seção caixão) e laje pré-moldada de vigotas treliçadas. Para isso, escolheu como referência o projeto arquitetônico de um edifício para habitação popular desenvolvido pela USIMINAS.

No que concerne aos ensaios realizados por David (2007), foram ensaiadas oito vigas mistas aço-concreto e uma viga de aço isolada (que servirá como referência). Para determinação das propriedades mecânicas do concreto quanto a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade e resistência à compressão do concreto, foram moldados corpos-de-prova segundo as especificações da ABNT NBR 5738:1984, e para o ensaio foi utilizada a máquina de ensaios ELE Autotest 2000. O cimento empregado foi de alta resistência inicial (ARI). Os perfis empregados foram fabricados com o aço de qualidade estrutural, USI-SAC



300 e suas propriedades mecânicas foram determinadas por meio de ensaios de tração direta, seguindo as prescrições da ASTM A 370 (1989).

Para o estudo das vigas mistas de aço e concreto, foram utilizados dois métodos: uma análise numérica e uma parte experimental. Na etapa experimental, foram realizados ensaios de cisalhamento direto tanto nos conectores quanto nas vigas mistas. As especificações dos conectores estão descritas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Conectores utilizados no ensaio de cisalhamento direto.**

Corpos de prova	Conector (mm)	Espessura da laje (mm)	
CP A22*	U 75x50x2,25	120	
CP A22-1	U 75x50x2,25	120	
CP A22-2	U 75x50x2,25	120	
CP A3	U 75x50x3,75	120	
CP A3**	U 75x50x3,75	120	
CP A4*	U 75x50x4,75	120	
CP A4-1	U 75x50x4,75	120	
CP A4-2	U 75x50x4,75	120	
CP B22	U 100x50x2,25	140	
CP B3*	U 100x50x3,75	140	
CP B3	U 100x50x3,75	140	
CP B3**	U 100x50x3,75	140	
CP B4	U 100x50x4,75	140	
CP C22	U 125x50x2,25	160	
CP C3	U 125x50x3,75	160	
CP C3**	U 125x50x3,75	160	
CP C4	U 125x50x4,75	160	

\* Carregamento monotônico  
 \*\* Presença de armadura transversal adicional  
 Comprimento do conector igual a 100mm

Fonte: David, 2007.

A composição da nomenclatura dos conectores de cisalhamento está demonstrada na Tabela 4.

**Tabela 4 - Composição da nomenclatura dos conectores.**

Altura do conector e da laje	A	- conector com altura igual a 75 mm - laje com altura igual a 100 mm
	B	- conector com altura igual a 100 mm - laje com altura igual a 120 mm
	C	- conector com altura igual a 125 mm - laje com altura igual a 160 mm
Espessura do conector	22	espessura nominal igual à 2,25 mm
	3	espessura nominal igual à 3,75 mm
	4	espessura nominal igual à 4,75 mm

Quando houver ensaios repetidos estes serão indicados por -1 e -2

Fonte: David, 2007.

As características dos modelos de vigas mistas ensaiados estão descritas na Tabela 5.

**Tabela 5 - Descrição das vigas.**

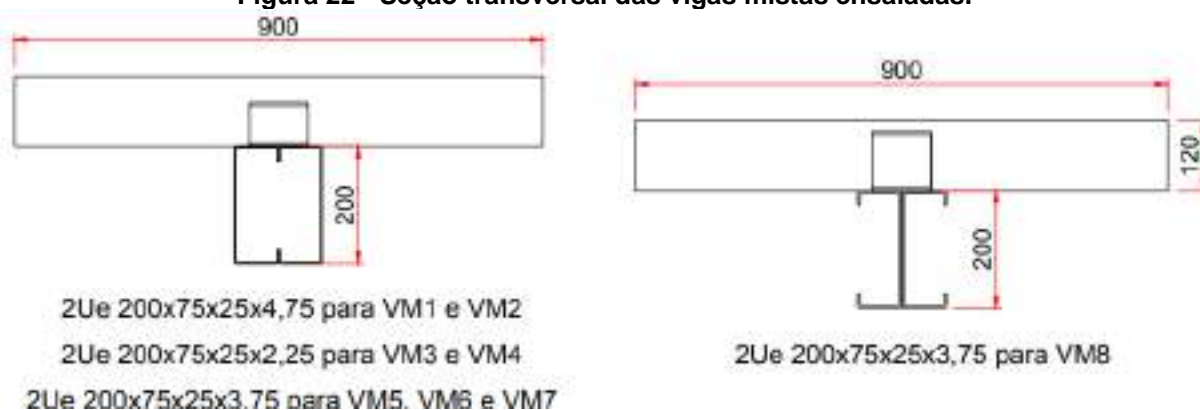
Vigas	Perfil da viga (mm)	Conector (mm)	Grau de interação	Posição do conector	Posição da armadura adicional transversal
VM1	2Ue 200x75x25x4,75	U 75x50x2,25	0,31	Vigotas	Sem
VM2	2Ue 200x75x25x4,75	U 75x50x2,25	0,31	Vigotas	Vigotas
VM3	2Ue 200x75x25x2,25	U 75x50x3,75	0,85	Vigotas	Vigotas
VM4	2Ue 200x75x25x2,25	U 75x50x3,75	0,86	EPS	Vigotas
VM5	2Ue 200x75x25x3,75	U 100x50x3,75	0,82	Vigotas	Sem
VM6	2Ue 200x75x25x3,75	U 100x50x3,75	0,76	Vigotas	Vigotas
VM7	2Ue 200x75x25x3,75	U 100x50x3,75	0,77	EPS	Vigotas
VM8	2Ue 200x75x25x3,75	U 100x50x3,75	0,79	Vigotas	Vigotas
V	2Ue 200x75x25x3,75	-	-	-	-

VM8 : Viga metálica em seção transversal I, as demais vigas em seção caixão

Fonte: David, 2007.

A seção transversal das vigas mistas que foram ensaiadas está apresentada na Figura 22. Sendo sete vigas de seção caixão e uma viga de seção I.

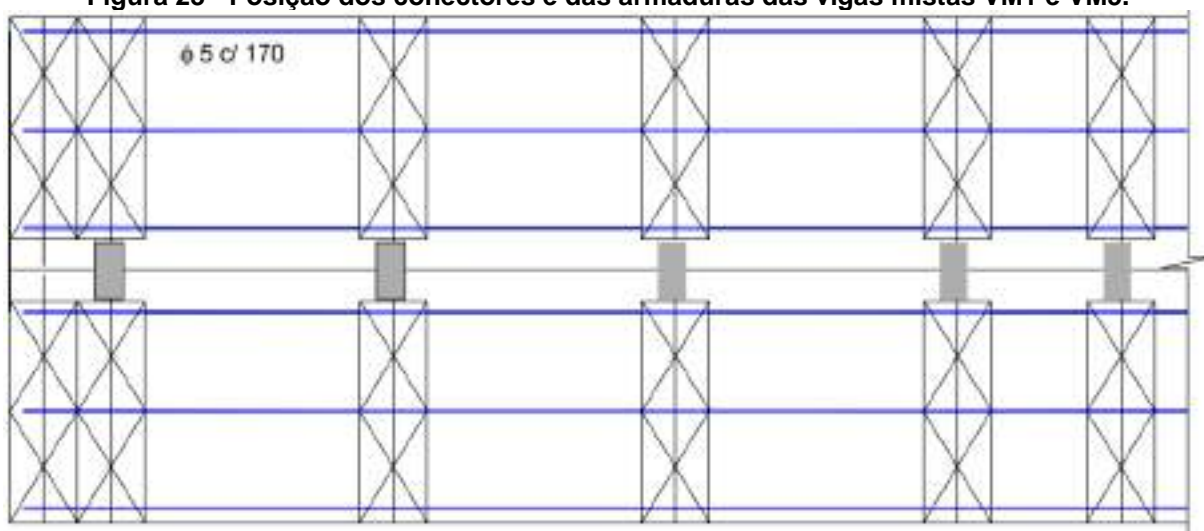
**Figura 22 - Seção transversal das vigas mistas ensaiadas.**



Fonte: David, 2007.

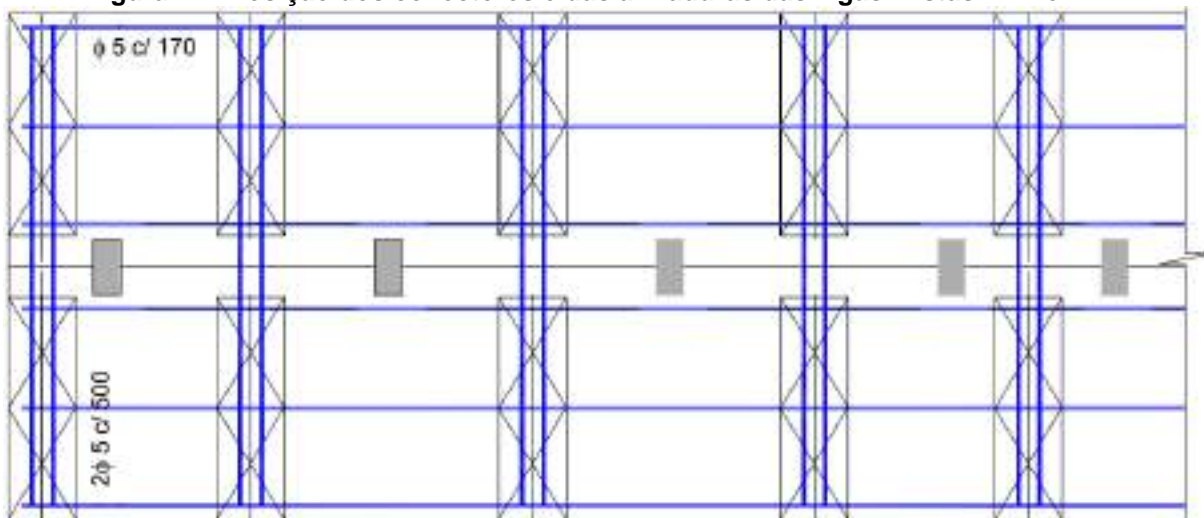
O arranjo dos elementos que compõem a viga mista foi feito com algumas variações. Sendo que nas vigas VM1, VM2, VM3, VM5, VM6 e VM8 os conectores de cisalhamento e as vigotas treliçadas foram posicionadas de forma alinhada e, nas vigas VM4 e VM7 os conectores de cisalhamento foram alinhados com o enchimento. Devido a laje ser constituída pelo sistema de vigotas treliçadas, utilizou-se armadura de distribuição e em alguns casos fez-se o uso de armadura adicional transversal. O posicionamento dos conectores de cisalhamento e dessas armaduras pode ser observado nas Figuras 23 a 25.

**Figura 23 - Posição dos conectores e das armaduras das vigas mistas VM1 e VM5.**



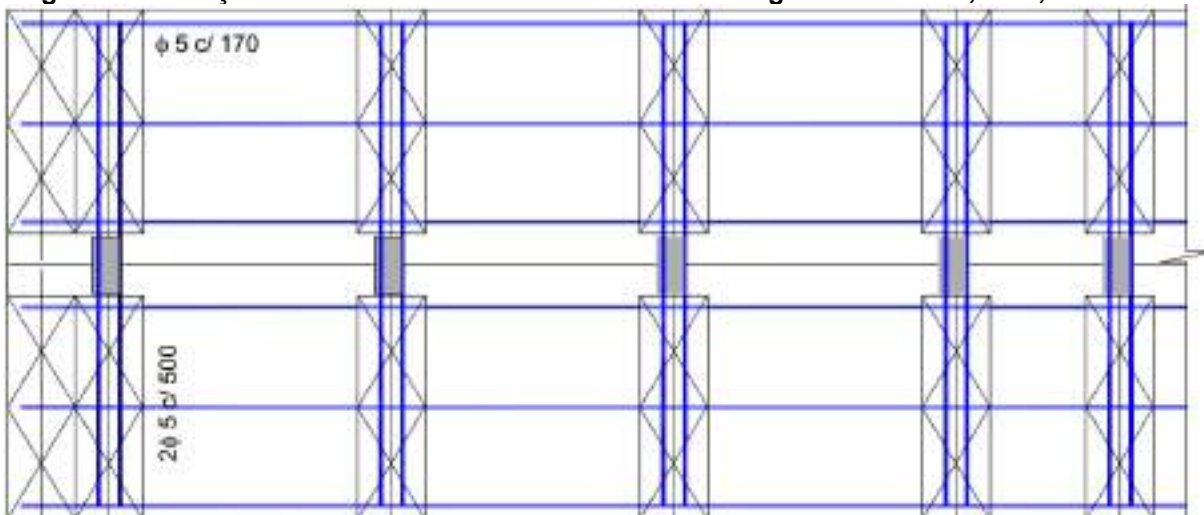
Fonte: David, 2007.

Figura 24 - Posição dos conectores e das armaduras das vigas mistas VM4 e VM7.



Fonte: David, 2007.

Figura 25 - Posição dos conectores e das armaduras das vigas mistas VM2, VM3, VM6 e VM8.



Fonte: David, 2007.

As peças foram ensaiadas em posição normalizada, conforme o EUROCÓDIGO 4:2001 prescreve (Figura 26).

**Figura 26 - Ensaio de cisalhamento direto.**



**Fonte: David, 2007.**

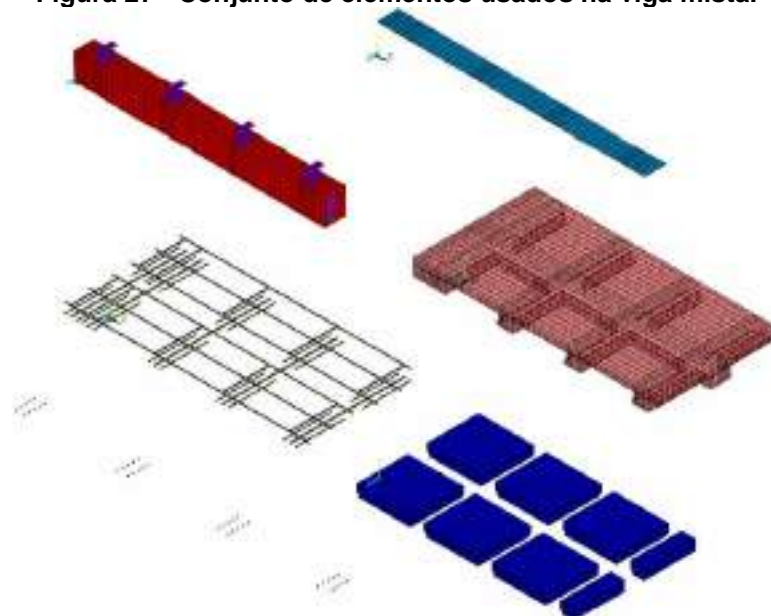
Para a análise numérica, foram desenvolvidos modelos numéricos tridimensionais, com consideração da não linearidade física e geométrica, correspondentes às vigas ensaiadas. Para a região de interface entre a laje e o perfil foi proposto três estratégias:

- Estratégia 1: nós da interface acoplados em todas as direções;
- Estratégia 2: conectores modelados com elementos de casca juntamente com o par de contato;
- Estratégia 3: conectores simulados como molas e os nós da interface acoplados na direção vertical e transversal ao eixo da viga.

A simulação numérica foi realizada por meio do código de cálculo ANSYS. Os componentes da viga mista foram discretizados pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), mais especificamente pelos tipos: Elemento Solid 65, que foi utilizado para a discretização da laje de concreto; Elemento Shell 181, que foi utilizado para discretizar o perfil de aço e os conectores; Elemento Link 8, que foi utilizado para discretizar as barras de armaduras; Target 170 e Contact 173, que foi utilizado para a associação do contato entre a superfície do perfil e da laje; Combin 39, para substituir o conector por molas, para ligar a laje ao perfil e simular a rigidez do conector na direção longitudinal.

Os componentes dos modelos desenvolvidos foram: laje de concreto, viga de aço, conectores de cisalhamento, armadura, par de contato na interface laje-viga, blocos de EPS e molas. A modelagem desses elementos pode ser vista na Figura 27.

**Figura 27 - Conjunto de elementos usados na viga mista.**



**Fonte: David, 2007.**

Sobre os resultados obtidos com os ensaios de cisalhamento direto, pôde-se notar que não houve alterações significativas no comportamento dos conectores ensaiados com carregamento monotônico e cíclico. Ainda sobre os conectores, comprovou-se que a sua altura não gera influência na sua resistência, já com relação a sua espessura, quanto mais espesso for o conector, maior é sua resistência. Ao se relacionar esses dois fatores é possível definir a ductibilidade do mesmo. As vigas em que se adicionou armadura transversal, apresentaram-se com resistência superior as que não possuíam – possivelmente devido ao maior confinamento do concreto na região do conector – e tem influência significativa na ductibilidade, podendo aumentá-la.

Quanto aos resultados obtidos nas investigações experimentais dos ensaios de flexão, notou-se que nas vigas em que os conectores não estavam situados na região de maior inércia, junto às treliças, e sim entre o material de enchimento, ocorreu uma excessiva separação vertical entre a laje e o perfil. Porém, se o conector estiver parcialmente embutido na capa de concreto, ele torna-se mais eficiente no combate da separação vertical. Isso implica que a posição dos conectores em relação às

vigotas não apresentou influência quanto ao comportamento global da viga, porém o estado limite último foi diferente. Cabe ressaltar que não constatou-se diferença na viga mista com perfil de seção I em relação à seção caixão.

Já pela análise numérica, que teve o intuito de comparar o comportamento das vigas mistas do ensaio experimental com a modelagem, dentre as três estratégias, a estratégia 3 (utilização de molas em substituição aos conectores) apresentou os resultados mais satisfatórios, no sentido de que suas respostas foram as mais próximas se equiparadas com as respostas apresentadas pelos ensaios experimentais.

Também será aproveitado neste trabalho os estudos desenvolvidos por Bruno Higaki, que em sua dissertação publicada em 2009, realizou análises experimentais e numérica com o intuito de verificar o comportamento estrutural de vigas mistas constituídas por perfis de aço laminado e laje de vigotas pré-moldadas treliçadas em um pavimento tipo nos estados limites de serviços e último, objetivando também, observar a propagação de fissuras para diferentes tipos de carregamentos (distribuído e concentrado) e verificar a necessidade da execução de uma faixa maciça de concreto na laje ao longo das vigas metálicas.

Na fase experimental o protótipo ensaiado foi composto por dois pórticos e uma laje pré-moldada do tipo bidirecional formando um pavimento tipo. Um dos pórticos é composto por um pilar de canto e um pilar de extremidade e o outro apresenta um pilar de extremidade e pilar intermediário além de um balanço na direção das vigas principais dos pórticos e um balanço direção das vigas secundárias. Todos os perfis que constituíram a estrutura do pavimento tipo foram do tipo laminados e produzidos pela Açominas. Para os pilares foram utilizados perfis HP200 X 53,0 kg/m, as vigas principais foram compostas por perfis W200 X 26,6 kg/m e as vigas secundárias por W150 X 13kg/m. Os conectores de cisalhamento foram formados por perfis U75 X 50 X 4,75 mm formados a frio e posicionados na direção das vigotas. Foi feito, ainda, a ligação do topo dos pilares com perfis do tipo U6" X 12,2 kg/m. Durante a execução houve o escoramento da laje. Foram realizados ainda, ensaios para a caracterização dos materiais (concreto e aço) e seus resultados estão apresentados nas Tabelas 6 e 7 a seguir.

**Tabela 6 - Resistência à compressão dos corpos de provas de concreto.**

Corpo de Prova	Resistência (MPa)
15 dias	17,67
21 dias	20,03
Ensaio	26,13

Fonte: Higaki, 2009.

**Tabela 7 - Resumo das características dos aços dos perfis e armaduras.**

Corpo de prova	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	E (kN/cm <sup>2</sup> )
Alma do pilar	39,3	38,4	23401,0
Alma da viga principal	31,1	36,0	21398,6
Alma da viga secundária	38,8	45,4	22098,7
Armadura 8 mm	62,1	71,6	21073,9
Armadura 10 mm	59,1	69,7	20418,2
$f_y$ = tensão de escoamento			
$f_u$ = tensão na ruptura			
E = módulo de elasticidade			

Fonte: Higaki, 2009.

Na modelagem numérica foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional para o estudo da viga mista do pavimento tipo considerando a não linearidade geométrica do material. foram utilizados o código de cálculo ANSYS e um software específico para o pré-processamento denominado TRUEGRID. Higaki (2009) utilizou do Método dos Elementos Finitos para fazer a discretização dos elementos constituintes da viga mista. Para tanto, ele usou os tipos: Solid65, utilizado na discretização da laje de concreto; Shell43, foi usado na discretização das vigas de aço; Targe170 e Conta173, associados para realizar a consideração do contato entre a viga de aço e a laje de concreto; Concrete, para representar as características à tração do concreto.

Os modelos desenvolvidos foram constituídos pelos seguintes elementos: vigas de aço principais e secundárias, vigotas de concreto em duas direções, capa da laje de concreto e pares de contato viga-laje.

As discussões feitas por Higaki (2009) sobre o comportamento apresentado pelas vigas mistas, teve ênfase nos deslocamentos ocorridos durante a variação de



carregamentos (distribuído e concentrado) e nas fissurações apresentadas nas lajes. Ele observou que as primeiras fissuras surgiram quando foram inseridos os momentos negativos na laje por meio dos carregamentos aplicados na região do balanço das vigas principais. Foi nos períodos de carregamentos concentrados que se aumentaram a fissuração da laje principalmente nas etapas em que o carregamento foi aplicado sobre a laje. Afirmou ainda que a execução da faixa maciça de concreto sobre a viga de aço com largura igual à largura efetiva para as vigas mistas mostrou-se necessária, pois a aplicação de carregamentos sobre a laje em regiões próximas às vigas pode ocasionar a ruptura da laje de concreto com valores de carregamento abaixo do estado limite último das vigas mistas.

As conclusões feitas a respeito da modelagem numérica foram que, os modelos gerados utilizando elementos de casca para as vigas metálicas e elementos sólidos para a laje de concreto apresentaram boa convergência de resultados em comparação aos obtidos nos ensaios experimentais. Além disso, nos modelos em que as vigas foram simplesmente apoiadas os resultados aproximaram-se bem dos resultados encontrados experimentalmente, comprovando que o comportamento semirrígido das ligações aproximou-se de uma rótula.

Diante do que foi exposto durante todo o desenvolvimento deste trabalho é possível propor um arranjo eficiente para a execução da viga mista aço-concreto. Os conectores de cisalhamento devem ser soldados a mesa superior da viga metálica. É interessante usar os conectores igualmente espaçados, pois isso permitirá que o conector absorva a força de cisalhamento atuante nos conectores vizinhos e uniformizem a resistência da conexão. Também deve-se buscar fazer com que os conectores fiquem alinhados com as vigotas treliçadas. Caso não seja possível, pode aumentar a altura do conector até que parte dele fique embutido no capeamento de concreto, isso para evitar/minimizar o deslocamento vertical. Caso se faça necessário o uso de armadura transversal adicional, esta deve ser uniformemente distribuída ao longo do vão da viga, posicionada na face inferior da laje sobre ou inseridas nas vigotas treliçadas. O escoramento só se faz necessário a depender de um alto carregamento.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivos uma investigação teórica, com o intuito de descrever o comportamento mecânico na região da interface da viga metálica com a laje treliçada, apresentando as suas características, vantagens e desvantagens e verificando a importância do uso de conectores de cisalhamento, além de, propor fatores importantes na execução da peça. A escolha por esses arranjos foram feitas pretendendo-se trazer uma certa inovação ao se utilizar de materiais que possuem pouco acervo técnico, mas muita usabilidade na construção civil. O intuito principal foi trazer mais uma análise comportamental do que um dimensionamento do sistema misto.

A partir do trabalho desenvolvido por Ferreira, Souza e Machados (2017), foi possível perceber que na comparação entre as lajes, considerando uma mesma altura para ambas, a laje treliçada possui vantagem por ser compostas por material inerte que traz economia no consumo de concreto e por consequência deixa a estrutura mais leve. Quanto a comparação em o sistema ser escorado ou não, a laje treliçada apresentou menor consumo de aço, no entanto, esse ganho só é expressivo quando se tem grandes carregamentos na edificação.

Nas análises desenvolvidas por David (2007), ficou evidenciado que a espessura do conector está relacionada a sua resistência e que, a razão entre a altura do conector e sua espessura definem sua ductibilidade. Com relação a utilização de armadura transversal adicional percebeu-se que esta proporcionou um leve aumento da resistência da viga e que o posicionamento dos conectores não tem influência na resistência da viga, mas, interfere no estado limite último.

Por fim, Higaki (2009) contribuiu ao mostrar que é diferente analisar o comportamento de uma viga mista de forma isolada e analisá-la sendo componente de um pavimento inteiro, pois inevitavelmente os demais elementos estruturais vão contribuir na amenização dos seus esforços, assim como, podem ser eles os causadores do infortúnio.

Os autores que foram consultados para coleta de dados utilizaram-se de parâmetros experimentais para descrever o comportamento das estruturas mistas compostas pelos elementos já citados. A modelagem numérica foi realizada para fins comparativos e comprobatórios, ou seja, o intuito é averiguar se o comportamento real

da estrutura está de acordo com as premissas estipuladas pelas características dos materiais e pelos cálculos realizados no dimensionamento das peças.

De posse dos resultados obtidos pela bibliografia de referência, é possível obter indicativos de que a combinação dos componentes propostos para a estrutura mista tem uma utilização viável sobre o ponto de vista estrutural, desde que se siga as recomendações propostas, pois como já foi mencionado há uma inexistência e/ou superficialidade sobre o assunto em normas técnicas disponíveis, não sendo possível tratar de todos os critérios necessários para um dimensionamento e ensaios mais assertivos e específicos, tendo que se deter a extrapolações e aproximações.

Mesmo este estudo tratando-se de uma pesquisa mais teórica e utilizando-se de resultados obtidos por outros autores no que concerne aos experimentos, pode-se afirmar que num aspecto geral os objetivos propostos foram alcançados.

Por fim, concluo que mesmo diante das vantagens apresentadas sobre a utilização de estruturas mistas em edificações há um empecilho no que concerne ao seu dimensionamento, principalmente se tratando da variabilidade de combinações entre elementos, sendo assim importante realizar mais experimentos para se desenvolver formulações que auxiliem no dimensionamento e proponham o desempenho que a estrutura deve manifestar.

## REFERÊNCIAS

ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto. 2000. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

doi:10.11606/D.18.2000.tde-18082006-143950. Acesso em: 2021-05-23.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

CUNHA, M.O. Recomendações para projeto de lajes formadas por vigotas com armação treliçada. 119p. 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2012.

CLÍMACO, João Carlos Teatini de Souza. Estruturas de Concreto Armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação. 2ª ed. Revisada. Brasília: Editora Universidade de Brasília: Finatec, 2008.

CRUZ, P. J. S.; VALENTE, I.; VERÍSSIMO, GUSTAVO S.; PAES, JOSÉ LUIZ R.; FAKURY, R. H.; (2006). Desenvolvimentos recentes no domínio da conexão aço-concreto no contexto das estruturas mistas. VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, Brasil, abril 2006.

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

DAVID, Daniela Lemes. Vigas Mistas com Laje Treliçada e Perfis Formados a Frio: Análise do Comportamento Estrutural. 2003. 218 f. (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

DROPPA JÚNIOR, Alonso. Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada. 1999. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. doi:10.11606/D.18.2017.tde-06122017-152937. Acesso em: 2021-04-12.

FERREIRA, Alvaro; SOUZA, Andréia Venina; MACHADO, Elizeth Rodrigues. Estudo comparativo de viabilidade para grandes vãos em sistema misto aço e concreto: vigas mistas com laje treliçada e vigas mistas com laje com forma de aço incorporada. Revista Petra, v. 3, n. 2, 2017.

European Committee for Standardization (2002). Eurocode 4 - (Final Draft of prEN 1994-1-1). Design of composite steel and concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings. Bruxelles.

FUZHARA, Marisa Aparecida Leonel da Silva. Ligações e armaduras de lajes em vigas mistas de aço e de concreto. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/D.3.2006.tde-07082007-120045. Acesso em: 2021-04-04.

GRIFFIS, L. G. The 1994 T.R. High Lectura: Composite Frame Construction in: National Steel Construction Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 18 – 20 maio, 1994. Proceedings. New York, AISC. v. 1, p. 1.1-1.72.

HIGAKI, Bruno Eizo. Análise teórica e experimental de vigas mistas de aço e concreto e laje com vigotas pré-moldadas e lajotas cerâmicas em um pavimento tipo. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

JOHNSON, R.P.; ANDERSON, D (2004). Designer's Guide to EN 1994 – 1 – 1. Eurocode 4: Design of Composite steel and concrete structure. Part 1.1: general rules and rules for buildings. London.

KIRCHHOF, Larissa Degliuomini. Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio. 2004. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. doi:10.11606/D.18.2004.tde-18082006-150938.

KOTINDA T. I. (2005) Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MALITE, M. Sobre cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios. 1990. 122f. Dissertação de Mestrado-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1990.

NARDIN, F, A. A Importância da Estrutura Metálica na Construção Civil. Monografia apresentada à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Civil da Universidade São Francisco, ITATIBA, 2008.

NARDIN, S. ET AL. Estruturas mistas aço-concreto: origem, desenvolvimento e perspectivas. In: 47 Congresso Brasileiro de Concreto, Ibracon, 2005, Olinda: Jacintho, A. E. P. G. A.; Monteiro, E.C.B.; Bittencourt, T.N., v. IV. p. IV69-IV84, 2005.

OEHLERS, D.J.; SVED, G. (1995). Composite Beams with Limited-Slip Capacity Shear Connectors. Journal of Structural Engineering, v.121, n.6, p.932-8, June.

OEHLERS, D.J.; NGUYEN, N.T.; AHMED, M.; BRADFORD, M.A. (1997). Partial Interaction in Composite Steel and Concrete Beams with Full Shear Connection. Journal of Constructional Steel Research, v.41, n.2/3, p.235-48, Feb/Mar.

OLIVEIRA, L. A. F. (2001). Estudo do comportamento e da resistência das vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis formados a frio e lajes pré-fabricadas. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

PFEIL, Walter. Estruturas de aço: dimensionamento prático | Walter Pfeil, Michele Pfeil. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MATA, L. A. C. Elementos das estruturas mistas aço-concreto. Ed. O Lutador, Belo Horizonte, 2001.

RAMOS, André Luiz. Análise numérica de pisos mistos aço-concreto de pequena altura. 2010. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. doi:10.11606/D.18.2010.tde-28072010-093719. Acesso em: 2021-05-13.

RODRIGUES, Tatiana Aparecida. Dimensionamento otimizado de vigas mistas aço-concreto. 2018. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SALES, M. W. R. Conector de cisalhamento tipo pino com cabeça para viga mista aço-concreto com laje alveolar. 2014. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

TINEO, Rafael Pereira. Ligação mista viga-pilar preenchido com chapa passante: modelagem numérica e análise paramétrica / Rafael Pereira Tineo. - São Carlos: UFSCar, 2016. 154 p.

TRISTÃO, Gustavo Alves. Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica. 2002. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. doi:10.11606/D.18.2002.tde-20062006-155133.