



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

PAULO SÉRGIO DE ASSIS FILHO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE VIGAS MISTAS E VIGAS DE CONCRETO
ARMADO DE SEÇÃO T COM ÊNFASE NA INFLUÊNCIA DO VÃO**

RUSSAS
2019

PAULO SÉRGIO DE ASSIS FILHO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE VIGAS MISTAS E VIGAS DE CONCRETO
ARMADO DE SEÇÃO T COM ÊNFASE NA INFLUÊNCIA DO VÃO

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

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

RUSSAS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A866a Assis Filho, Paulo Sérgio de.
Análise comparativa entre vigas mistas e vigas de concreto armado de seção T com ênfase na influência do vão / Paulo Sérgio de Assis Filho. – 2019.
69 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante.
1. Vigas mistas. 2. Vigas de concreto armado de seção T. 3. Influência do vão. I. Título.
- CDD 620
-

PAULO SÉRGIO DE ASSIS FILHO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE VIGAS MISTAS E VIGAS DE CONCRETO
ARMADO DE SEÇÃO T COM ÊNFASE NA INFLUÊNCIA DO VÃO

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

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof^a. Ms. Andriele Nascimento de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Célia e Paulo.

A minha irmã, Paula.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me ajudar a enfrentar todas as dificuldades encontradas e estar presente na minha vida.

A minha família, aos meus pais, Célia Gadelha e Paulo Sérgio, e a minha irmã, Paula Gadêlha, por terem me apoiado e me incentivado durante todo o período desta difícil jornada em busca do meu sonho de ser um engenheiro civil.

Ao professor Otávio Rangel, por ter aceitado ser meu orientador, por ter tirado minhas dúvidas e pela contribuição para a concretização deste trabalho.

Aos meus amigos mais próximos que fiz na graduação, Ian Mateus, Jocássia Lima, Larisse Gama, Rayanne Lara e Thalyta Bruna, por toda a ajuda, amizade e companheirismo durante a nossa jornada acadêmica.

Aos meus amigos, Afonso Matheus, Antônio Filho, Bruno Andrade, Erik Henrique, Janyce Moura, Natália Lima, Samuel Moura, Vanessa Maria e todos os outros, pelos bons momentos e pela amizade mesmo na minha ausência.

As professoras Camila Lima e Andriele Nascimento, por terem aceitado participar da banca examinadora, pelo tempo investido e pelas sugestões realizadas.

Aos meus colegas de curso, por terem participado e auxiliado na minha formação.

Aos professores e professoras do meu curso, pela capacidade de entregar o conhecimento de forma clara e objetiva e proporcionar o meu crescimento como pessoa.

RESUMO

O trabalho consiste no dimensionamento e na comparação entre vigas mistas aço-concreto e vigas de concreto armado de seção T considerando a variação dos vãos. Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica para elencar os principais procedimentos necessários segundo as normas, tendo em vista a confecção de uma rotina de cálculo para ambos os tipos de vigas. A partir disso, desenvolveu-se um estudo de caso básico visando a análise de vigas simplesmente apoiadas e submetidas ao mesmo carregamento linear com objetivo de observar a variação de alguns parâmetros das vigas como a altura, posição da linha neutra, consumo de aço, consumo de concreto e peso próprio para uma situação em que é possível a adoção dos dois sistemas construtivos. O dimensionamento buscou atender os critérios de satisfação dos estados limites últimos e dos estados limites de serviço de deformações excessivas utilizando-se as menores seções possíveis para que cada peça atenda as solicitações propostas. Nos resultados dos dimensionamentos das vigas mistas foi possível observar dois modelos para otimização do perfil metálico utilizado, um que beneficia a redução da altura da viga e outro que favorece a redução do peso e do consumo de aço. Além disso, foi observado que as vigas mistas apresentaram capacidades resistivas além do que era exigido para combater os esforços solicitantes, tal característica foi abordada em análises adicionais. Por fim, a partir dos comparativos, foi verificado que as vigas mistas consomem pelo menos o dobro de aço em relação as vigas de concreto armado e que o aumento dos vãos pode até triplicar o consumo de aço, enquanto que vantagens foram apresentadas na redução considerável da altura e do peso próprio da viga.

Palavras-chave: Vigas mistas. Vigas de concreto armado de seção T. Influência do vão.

ABSTRACT

The work consists on the design and comparison between steel-concrete composite beams and T-section reinforced concrete beams considering the variation of the spans. Initially, a literature review was performed to list the main procedures required according to the standards, in order to create a calculation routine for both types of beams. From this, a basic case study was developed aiming at the analysis of simply supported beams submitted to the same linear loading in order to observe the variation of some parameters of the beams such as height, neutral line position, steel consumption, concrete consumption and its own weight for a situation where the adoption of both building systems is possible. The design sought to meet the criteria of satisfaction of the ultimate limit states and the service limit states of excessive deformation using the smallest possible sections so that each part meets the proposed requests. In the composite beam design results, it was possible to observe two models to optimize the metal profile used, one that benefits from the reduction of the beam height and another that favors the reduction of weight and steel consumption. In addition, the composite beams presented resistive capacities beyond what was required to combat the requesting efforts, such feature was addressed in further analysis. Finally, from the comparative, the mixed beams consumed at least twice as much steel as the reinforced concrete beams and that the increase of the spans can even triple the steel consumption, while advantages presented in the considerable reduction on the height and the weight of the beam itself.

Keywords: Composite beams. T-section reinforced concrete beams. Span influence.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Viga mista típica e seus elementos..... | 21 |
| Figura 2.2 – Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas..... | 22 |
| Figura 2.3 – Conector tipo pino com cabeça (<i>stud bolt</i>)..... | 23 |
| Figura 2.4 – Largura efetiva da laje (b_e)..... | 25 |
| Figura 2.5 – (a) Parâmetros da viga mista; (b) Linha neutra plástica na laje de concreto; (c) Linha neutra plástica no perfil de aço..... | 27 |
| Figura 2.6 – Geometria típica da viga seção de T..... | 33 |
| Figura 2.7 – Posição da linha neutra na mesa e, em seguida, na alma da viga de seção T..... | 34 |
| Figura 2.8 – Distribuição das áreas de compressão..... | 35 |
| Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa..... | 43 |
| Figura 3.2 – Fluxograma das etapas do dimensionamento de vigas mistas..... | 44 |
| Figura 3.3 – Fluxograma das etapas do dimensionamento de vigas de seção T..... | 46 |
| Figura 3.4 – Disposição do aço nas armaduras da viga “T” | 47 |
| Figura 4.1 – Representação básica do estudo de caso..... | 49 |
| Figura 4.2 – Representação do carregamento da viga biapoiada..... | 50 |
| Figura 4.3 – Representação do perfil de aço W e de suas dimensões..... | 51 |
| Figura 5.1 – Comparativo entre a altura das vigas mistas e das vigas de concreto armado de seção T..... | 56 |
| Figura 5.2 – Relação entre o comprimento do vão sobre a altura das vigas dimensionadas..... | 57 |
| Figura 5.3 – Consumo de aço das vigas dimensionadas..... | 58 |
| Figura 5.4 – Consumo de concreto das vigas dimensionadas..... | 59 |
| Figura 5.5 – Posição da linha neutra nas vigas dimensionadas..... | 60 |
| Figura 5.6 – Peso próprio das vigas dimensionadas..... | 61 |
| Figura 5.7 – Análise de aproveitamento da seção quanto ao momento..... | 63 |
| Figura 5.8 – Carregamentos lineares suportados para o ELU e o ELS..... | 64 |
| Figura 5.9 – Deslocamentos calculados para o ELU e o ELS..... | 65 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Propriedades geométricas de vigas mistas em regimes elásticos..... | 31 |
| Tabela 5.1 – Vigas mistas otimizadas pelo peso do perfil metálico..... | 53 |
| Tabela 5.2 – Vigas mistas otimizadas pela altura do perfil metálico..... | 54 |
| Tabela 5.3 – Vigas de concreto armado de seção T..... | 55 |

LISTA DE SÍMBOLOS

VIGAS MISTAS

| | |
|--------------|--|
| A_{cs} | Área da seção transversal do conector |
| A_i | Área do elemento |
| A_p | Área do perfil metálico |
| A_w | Área da alma |
| b_e | Largura efetiva da laje de concreto |
| b_f | Largura da mesa do perfil metálico |
| C_{ad} | Força resistente de compressão no aço |
| E_a | Módulo de elasticidade do aço |
| E_{cs} | Módulo de elasticidade secante do concreto. |
| f_{ck} | Resistência característica a compressão do concreto |
| F_{hd} | Força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e da laje |
| f_{ucs} | Resistência à ruptura do aço do conector |
| f_y | Tensão de escoamento do aço |
| h | Altura do perfil metálico |
| H | Altura total da viga |
| h_c | Espessura da laje de concreto |
| h_p | Espessura da pré-laje pré-moldada de concreto ou a altura da nervura da forma de aço |
| h_w | Altura da alma do perfil metálico |
| I_0 | Momento de inércia do elemento |
| I_{ef} | Momento de inércia da seção efetiva reduzida |
| I_p | Momento de inércia do perfil metálico |
| I_{tr} | Momento de inércia da seção homogeneizada ou transformada |
| L | Comprimento do vão |
| $M_{d\ res}$ | Momento resistente de cálculo |
| n | Quantidade de conectores |
| n_i | Grau de interação da viga mista |
| q_d | Carregamento linear de cálculo da viga |
| q_k | Carregamento linear de serviço da viga |
| Q_{Rd} | Força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento |

| | |
|----------------|---|
| R_{cd} | Resistência máxima de compressão |
| R_g | Coefficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores |
| R_p | Coefficiente para consideração da posição do conector |
| R_{td} | Resistência máxima de tração |
| t_f | Espessura da mesa do perfil metálico |
| t_w | Espessura da alma do perfil metálico |
| $V_{d\ res}$ | Força cortante resistente de cálculo |
| V_{pl} | Força cortante para plastificação da alma |
| x | Posição da linha neutra plástica na seção de concreto |
| y | Distância da linha neutra plástica até a face superior do perfil de aço |
| y' | Posição do centro de gravidade do elemento |
| y_0 | Posição da linha neutra elástica |
| y_c | Distância do centroide da parte comprimida do perfil até a face superior desse perfil |
| y_s | Distância do centroide do perfil até a borda superior da mesa desse perfil |
| y_t | Distância do centroide da parte tracionada do perfil até a face inferior desse perfil |
| α_e | Razão modular |
| γ_{a1} | Coefficiente de minoração de resistência do aço estrutural |
| γ_c | Coefficiente de minoração de resistência do concreto |
| γ_{cs} | Coefficiente de ponderação da resistência do conector |
| δ | Deslocamento ou flecha total no meio do vão |
| δ_{lim} | Deslocamento ou flecha limite |

VIGAS DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO T

| | |
|-------------|---|
| $(EI)_{eq}$ | Rigidez equivalente da seção das vigas de concreto armado |
| A_c | Área total da seção de concreto |
| A_s | Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração |
| A_{s1} | Parcela da área transversal da armadura longitudinal de tração das abas da laje |
| A_{s2} | Parcela da área transversal da armadura longitudinal de tração da alma da viga |
| A_{sw} | Área da seção transversal dos estribos |
| b_f | Largura da mesa colaborante |
| b_w | Largura da alma da viga |
| d | Altura útil |

| | |
|----------------------|--|
| f_{cd} | Resistência de cálculo do concreto a compressão |
| f_{cta} | Resistência de cálculo do concreto a tração direta |
| f_{ctm} | Resistência média a tração direta do concreto |
| f_{yd} | Resistência de cálculo do aço a tração |
| f_{ywd} | Resistência de cálculo do aço na armadura transversal |
| h | Altura da viga |
| h_f | Espessura da mesa colaborante |
| I_{II} | Momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II |
| I_c | Momento de inércia da seção bruta de concreto ou do estágio I |
| $M_{1d \text{ res}}$ | Momento fletor resistente de cálculo das abas da laje |
| $M_{2d \text{ res}}$ | Momento fletor resistente de cálculo da alma da viga |
| M_a | Momento fletor máximo no vão |
| $M_d \text{ sol}$ | Momento de cálculo solicitante |
| M_r | Momento de fissuração do elemento estrutural |
| p' | Taxa de armadura de compressão |
| V_c | Força cortante resistida pela geometria da viga |
| $V_d \text{ res}$ | Força cortante de cálculo resistente referente a falha por tração diagonal |
| $V_{d2 \text{ res}}$ | Força cortante de cálculo resistente referente a falha das diagonais comprimidas de concreto |
| $V_d \text{ sol}$ | Força cortante de cálculo solicitante |
| V_{sw} | Força cortante resistida pela armadura transversal da viga |
| x | Posição da linha neutra |
| x_{II} | Posição da linha neutra no estágio II |
| y_{cg} | Posição do centro de gravidade da seção |
| y_t | Distância do centro de gravidade da viga de concreto à fibra mais tracionada |
| α | Fator de correlação de tração |
| α_f | Coefficiente da consideração da fluência nas flechas das vigas de concreto armado |
| δ | Deslocamento ou flecha total nas vigas de concreto armado considerando a fluência |
| δ_i | Deslocamento ou flecha imediata |
| $\Delta\varepsilon$ | Variação do coeficiente da fluência em função do tempo de aplicação das cargas |

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | Justificativa | 17 |
| 1.2 | Objetivos | 17 |
| <i>1.2.1</i> | <i>Objetivo geral</i> | 17 |
| <i>1.2.2</i> | <i>Objetivos específicos</i> | 17 |
| 1.3 | Organização do trabalho | 18 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1 | Estados limites | 19 |
| <i>2.1.1</i> | <i>Estados limites últimos</i> | 19 |
| <i>2.1.2</i> | <i>Estados limites de serviço</i> | 20 |
| 2.2 | Vigas mistas | 20 |
| <i>2.2.1</i> | <i>Escoramento</i> | 21 |
| <i>2.2.2</i> | <i>Conectores de cisalhamento</i> | 21 |
| <i>2.2.3</i> | <i>Verificação da seção</i> | 24 |
| <i>2.2.4</i> | <i>Largura efetiva</i> | 25 |
| <i>2.2.5</i> | <i>Resistência ao momento fletor</i> | 26 |
| <i>2.2.5.1</i> | <i>Linha neutra plástica na laje de concreto</i> | 27 |
| <i>2.2.5.2</i> | <i>Linha neutra plástica no perfil de aço</i> | 28 |
| <i>2.2.6</i> | <i>Resistência ao esforço cortante</i> | 29 |
| <i>2.2.7</i> | <i>Definição do grau de interação e da quantidade de conectores</i> | 29 |
| <i>2.2.8</i> | <i>Determinação dos deslocamentos</i> | 30 |
| <i>2.2.8.1</i> | <i>Momento de inércia da seção homogeneizada</i> | 31 |
| <i>2.2.8.2</i> | <i>Deslocamentos máximos</i> | 32 |
| 2.3 | Vigas de concreto armado de seção T | 33 |
| <i>2.3.1</i> | <i>Largura da mesa colaborante</i> | 34 |
| <i>2.3.2</i> | <i>Armadura longitudinal simples resistente ao momento fletor</i> | 34 |
| <i>2.3.3</i> | <i>Armadura transversal resistente ao esforço cortante</i> | 37 |
| <i>2.3.4</i> | <i>Determinação dos deslocamentos</i> | 38 |
| <i>2.3.4.1</i> | <i>Momento de inércia da seção bruta</i> | 41 |
| <i>2.3.4.2</i> | <i>Momento de inércia da seção fissurada no estágio II</i> | 41 |
| <i>2.3.4.3</i> | <i>Deslocamentos máximos</i> | 42 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 3 | METODOLOGIA | 43 |
| 3.1 | Etapas da pesquisa | 43 |
| 3.2 | Etapas do dimensionamento das vigas | 44 |
| 3.3 | Apresentação dos resultados | 48 |
| 4 | ESTUDO DE CASO | 49 |
| 4.1 | Definição do estudo de caso | 49 |
| 4.2 | Determinação do carregamento | 49 |
| 4.3 | Considerações de projeto | 51 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 53 |
| 5.1 | Dimensionamento das vigas mistas | 53 |
| 5.2 | Dimensionamento das vigas de concreto armado de seção T | 54 |
| 5.3 | Comparações entre os dois tipos de vigas | 55 |
| 5.3.1 | <i>Altura</i> | 55 |
| 5.3.2 | <i>Consumo de aço e de concreto</i> | 58 |
| 5.3.3 | <i>Posição da linha neutra</i> | 60 |
| 5.3.4 | <i>Peso próprio</i> | 61 |
| 5.4 | Análises adicionais | 62 |
| 5.4.1 | <i>Relação entre o momento solicitante e resistente em vigas mistas</i> | 62 |
| 5.4.2 | <i>Comportamento de vigas mistas no ELU e no ELS</i> | 64 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 66 |
| | REFERÊNCIAS | 68 |

1 INTRODUÇÃO

Uma das maneiras mais eficientes para melhorar o desempenho das estruturas é utilizar as propriedades mais favoráveis dos materiais para uma determinada ação e combiná-las para obter o desempenho desejado com uma melhor relação de custo-benefício.

Os elementos estruturais mistos de aço e concreto são aqueles no qual um perfil de aço (laminado, soldado ou formado a frio) e uma seção de concreto trabalham em conjunto formando uma viga, laje ou pilar misto. Essa interação entre os dois componentes, o aço e o concreto, é obtida por meio de conectores de cisalhamento, por atrito, por aderência ou por redistribuições de cargas na seção (QUEIROZ et al., 2012).

Alva e Malite (2005) afirmam que as primeiras construções mistas no Brasil foram executadas nas décadas de 50 e 60 e consistiam em alguns edifícios e pequenas pontes. O aumento da produção do aço estrutural no Brasil e a busca de novos métodos construtivos nos últimos anos possibilitou o aumento na construção de vários edifícios por meio do sistema misto.

As vigas mistas aproveitam a alta resistência à tração, leveza e esbeltez do aço e a alta resistência a compressão e rigidez do concreto. A combinação desses elementos ofereceu vantagens em termos de economia pela possibilidade de dispensar a utilização de fôrmas e escoramentos durante o período construtivo. Higaki (2009) menciona que a execução das estruturas mistas viabiliza a construção de edifícios de múltiplos pavimentos sem que seja necessário a espera para cura e desforma do concreto.

O uso desse sistema estrutural em comparação com as vigas puramente metálicas apresenta maior rigidez devido a interação do aço com o concreto e viabiliza a capacidade de vencer vãos maiores em estruturas do tipo pórtico. Já quando comparada com as vigas de concreto armado, a adoção de sistemas mistos aço-concreto é competitiva para vãos médios e elevados, podendo ser caracterizada pela rapidez de execução e pela significativa redução no peso total dos elementos estruturais, levando a menores cargas verticais, possibilitando a redução das dimensões das estruturas de fundação (ALVA; MALITE; 2005).

Por outro lado, nota-se como prática construtiva frequente na construção civil, que as vigas de concreto armado são fabricadas monoliticamente com as lajes maciças e, portanto, deve-se considerar que, na realidade, as seções das vigas de concreto armado possuem formato de um T ou de um L em vez de uma simples seção retangular. A consideração do cálculo de vigas de seção T ao invés de seções simples possibilita uma maior eficiência estrutural, pois a seção T estabelece as distribuições de esforços internos e tensões de forma mais realista e propicia a construção de vigas com menores alturas e a redução na utilização de aço nas

armaduras de flexão, além de se obter menores deslocamentos (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

Tendo em vista o que foi exposto, o presente trabalho apresentará um estudo comparativo entre as vigas mistas e as vigas de concreto armado de seção T aplicadas em vãos médios a elevados de forma a verificar o comportamento de algumas características do dimensionamento como a altura, o consumo de materiais e o peso, visando as vantagens e as desvantagens da aplicação de um método construtivo em relação ao outro quando aplicados aos estados limites últimos e de serviço.

1.1 Justificativa

Partindo do pressuposto de que a utilização das vigas mistas possibilita a redução da altura e do peso dos elementos estruturais em relação as vigas de concreto armado, torna-se necessário quantificar essa redução e verificar as diferenças entre os sistemas construtivos quanto ao consumo de materiais. Já a variação dos vãos das vigas pode mostrar como é dado o desenvolvimento das propriedades analisadas e verificar se existem determinados pontos onde um método construtivo apresenta ser mais vantajoso em relação ao outro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar e comparar o dimensionamento de vigas mistas em relação as vigas de concreto armado de seção T sobre a influência da variação dos vãos quando submetidas as mesmas considerações de projeto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Fornecer diretrizes para o dimensionamento de vigas mistas e vigas de concreto armado de seção T;
- Apresentar as diferenças entre as alturas das vigas dimensionadas;
- Apresentar a comparação quantitativa de materiais utilizados no delineamento das vigas apresentadas;

- Comparar o peso próprio das seções necessárias para atender às verificações dos estados limites;
- Verificar a disposição das características das vigas mistas quanto a eficiência.

1.3 Organização do trabalho

Esse trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos principais. São eles a Introdução, a Revisão Bibliográfica, a Metodologia, o Estudo de Caso, os Resultados e as Discussões e, por fim, as Considerações Finais.

O Capítulo 1 trata-se da introdução, onde o tema é abordado de forma resumida. Além disso, apresenta-se as justificativas desse trabalho, os objetivos gerais e específicos a serem alcançados.

No Capítulo 2 é apresentado os conhecimentos teóricos necessários para a realização desse trabalho. Os temas abordados nesse capítulo são os estados limites últimos e de serviço, as vigas mistas e as vigas de concreto armado de seção T.

O Capítulo 3 expõe a metodologia utilizada para a confecção deste trabalho, dividida nas etapas da pesquisa e aborda os procedimentos utilizados para obtenção dos resultados.

No Capítulo 4 é exposto o estudo de caso do trabalho e as considerações de projeto utilizadas para o dimensionamento das vigas.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos através da aplicação da metodologia no estudo de caso. Além disso, neste mesmo capítulo é feita a comparação e a discussão acerca de alguns parâmetros encontrados nos resultados.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais acerca do trabalho e algumas sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo fornece as informações necessárias para os cálculos e o entendimento dos tipos de vigas abordadas para elaboração deste trabalho, as vigas mistas e as vigas de concreto armado de seção T, descrevendo seus critérios de projeto para o dimensionamento no estado limite último, considerando a resistência ao momento fletor e ao esforço cortante, e no estado limite de serviço, considerando somente o critério de deformações excessivas.

2.1 Estados limites

O cálculo de estruturas em concreto tem como objetivos garantir uma segurança adequada contra a falha, colapso total e contra determinadas condições de serviço. As bases do dimensionamento consistem em assegurar à obra, estabilidade, conforto e durabilidade. Quando estes objetivos não são atingidos, a estrutura atinge uma situação de “estado limite”, definida como estado limite último ou estado limite de serviço (FERNANDES, 1996).

2.1.1 Estados limites últimos

O estado limite último (ELU) é relacionado ao estado no qual a estrutura não pode ser utilizada devido ao esgotamento da capacidade resistente e o risco iminente de colapso. A estrutura quando atinge esse estado, geralmente, apresenta indícios antes de romper como barulhos, rachaduras em paredes ou elementos estruturais, tombamento parcial e outros. Neste caso, é recomendado a desocupação imediata da edificação para realização de reparos na estrutura ou até mesmo a sua demolição, quando constatado que a edificação está prestes a desmoronar (FERNANDES, 1996).

A perda da estabilidade da estrutura como corpo rígido, ruptura de seções críticas, colapso progressivo, flambagem dos elementos estruturais e fadiga dos materiais são algumas das causas do acontecimento da falha pelo estado último. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), norma brasileira que oferece os procedimentos do projeto de estruturas de concreto, o dimensionamento neste estado é feito seguindo as prescrições para adoção de coeficientes de ponderação, nas combinações de ações, que afastem os elementos estruturais de seu estado último, o que permite uma maior segurança no cálculo da estrutura por parte do projetista.

2.1.2 Estados limites de serviço

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

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), diferentemente do ELU, o ELS não oferece o risco iminente da ruptura da estrutura, estando ela apenas fora dos padrões normais de funcionamento, sendo necessário a realização de reparos para adequação da estrutura de forma que seja garantida a durabilidade prevista em projeto. Como neste estado a estrutura não atingiu a capacidade resistente última considera-se que a estrutura seja dimensionada ao ELU e verificada pelo ELS. Caso a estrutura não passe pelo ELS, o dimensionamento é verificado de forma inversa para satisfazer os dois estados limites.

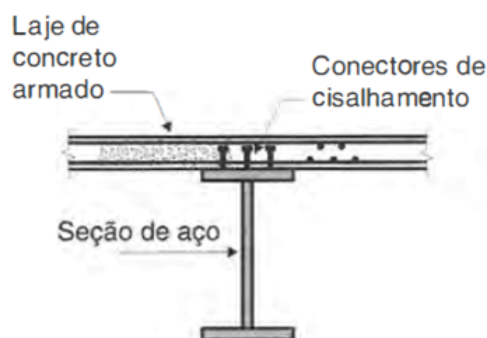
2.2 Vigas mistas

As vigas mistas aço-concreto, conforme mostrado na Figura 2.1, são constituídas pela associação de vigas de aço com a laje de concreto por meio de conectores de cisalhamento, elas apresentam vantagens estruturais nas regiões de momento positivo, em comparação com as vigas metálicas isoladas, pois segundo Alva e Malite (2005, p.54),

[...] a flambagem local da mesa e da alma (FLM e FLA), assim como a flambagem lateral com torção (FLT) são impedidas ou amenizadas. Outra vantagem da utilização de vigas mistas em sistemas de pisos é o acréscimo de resistência e de rigidez propiciados pela associação dos elementos de aço e de concreto, o que possibilita a redução da altura dos elementos estruturais, implicando em economia de material.

O comportamento misto é definido quando dois elementos estruturais são interconectados pelos conectores e se deformam como um único elemento. Caso não exista qualquer ligação ou atrito na interface, o aço do perfil e a seção de concreto suportarão cargas diferentes, assim, a face inferior da laje de concreto será tracionada e a face superior da viga metálica será comprimida, acarretando desta forma um deslizamento relativo entre as superfícies na região de contato (QUEIROZ et. al., 2012).

Figura 2.1 – Viga mista típica e seus elementos



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.2.1 Escoramento

As vigas mistas podem ser construídas com ou sem escoramento. Na condição escorada, o perfil de aço não precisa resistir aos esforços permanentes antes da cura do concreto, sendo assim, a viga mista pode apresentar deformações reduzidas devido a maior rigidez do sistema. Já na construção não escorada, o perfil de aço deve suportar o peso do concreto fresco e o seu peso próprio, o que leva ao aumento das deformações durante a construção e, conseqüentemente, a escolha de um perfil mais robusto que suporte as ações durante este período. Pfeil e Pfeil (2009, p. 271) afirmam que, “ [...] no estado limite último, as tensões de plastificação que se desenvolvem em uma certa seção mista são as mesmas nos dois casos e, portanto, a viga atinge o mesmo momento fletor resistente, seja ela escorada ou não. ”.

As vigas não escoradas podem apresentar deslocamentos excessivos durante a construção ou em serviço. Por outro lado, os custos com escoramento e restrições quanto ao espaço utilizável na obra são reduzidos ou eliminados. Já o sistema de vigas mistas com lajes maciças de concreto necessita de escoramento para conter o concreto fresco regularizado nas fôrmas de madeira.

2.2.2 Conectores de cisalhamento

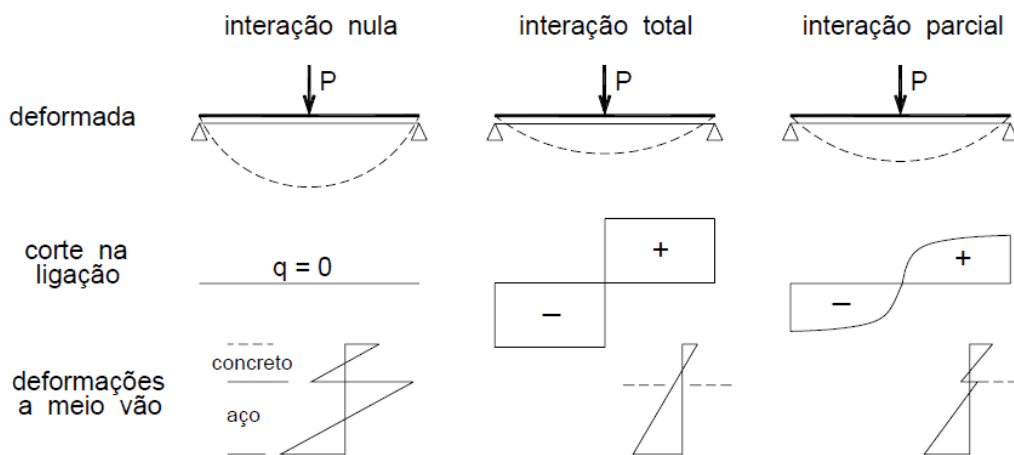
Os conectores de cisalhamento são definidos como dispositivos mecânicos destinados a garantir o trabalho conjunto da seção de aço com a laje de concreto. Sendo assim, o conector impede a separação física entre os componentes e absorvem os esforços cisalhantes que se desenvolvem na direção longitudinal entre a interface da laje com a mesa superior do perfil de aço (PFEIL; PFEIL, 2009).

Considerando que a ligação entre os elementos seja feita por conectores de rigidez e resistência infinitas para que as deformações ocorram de forma conjunta e as seções da viga mista permaneçam propriamente planas é dito que o diagrama de deformações apresenta uma única linha neutra, sendo assim os elementos interagem completamente entre si (QUEIROZ et. al., 2012).

Outro caso acontece quando a interligação não é suficientemente rígida ou resistente, onde verifica-se a existência de duas linhas neutras em que suas posições dependerão do grau de interação entre os dois elementos. Logo, haverá um deslizamento relativo entre as superfícies, porém menor que na situação em que não há qualquer ligação e, neste caso, a interação é chamada de parcial (QUEIROZ et al., 2012).

A Figura 2.2 ilustra os tipos de interações existentes, a interação nula, em que não é caracterizada a existência de uma estrutura mista, a interação total, onde permite-se a ligação perfeita entre os elementos e não ocorre deslizamento relativo entre eles e a interação parcial, na qual ocorre uma descontinuidade no diagrama de deformações, embora essa seja muito menor que na interação nula.

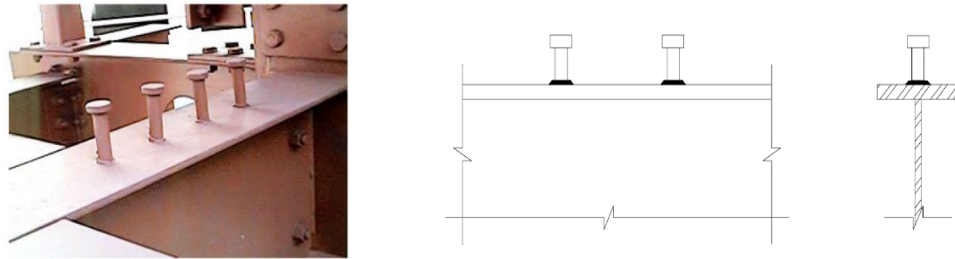
Figura 2.2 – Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas



Fonte: Alva e Malite (2005)

Segundo Alva e Malite (2005), os conectores de cisalhamento podem ser classificados em flexíveis ou rígidos. Os conectores mais utilizados são os do tipo pino com cabeça ou também chamado de conector *stud bolt*, ele é do tipo flexível e consiste em um pino especialmente projetado para a soldagem no perfil de aço.

Figura 2.3 – Conector tipo pino com cabeça (*stud bolt*)



Fonte: Adaptado de Alva e Malite (2005)

A NBR 8800 (ABNT, 2008) apresenta os critérios de projeto para os conectores pino com cabeça quanto ao cálculo da resistência, disposição e condições de instalação. A força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento *stud* é dada pelo menor dos valores das Equações 1 e 2:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{Rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_{cs}}}{\gamma_{cs}} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \end{array} \right. \quad (2)$$

Em que:

Q_{Rd} é a força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento

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

f_{ck} é a resistência do concreto;

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto;

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

R_g é um coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;

R_p é um coeficiente para consideração da posição do conector;

f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector.

A primeira equação refere-se ao apoio do pino no concreto, sendo a falha devido à ruptura do concreto na região do conector e a segunda equação trata-se da resistência a flexão do pino, neste caso a falha ocorre pela ruptura do aço do conector devido ao excesso de tensões de cisalhamento (PFEIL; PFEIL, 2009).

2.2.3 Verificação da seção

Nas vigas mistas de seção compacta não ocorrerá flambagem local antes da plastificação total da seção. Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), que fornece as diretrizes para o cálculo de estruturas de aço e mistas, as vigas mistas de aço e concreto devem possuir a relação entre a altura e espessura da alma do perfil metálico inferior ou igual a esbeltez limite para plastificação, neste caso, essas vigas serão compactas e não ocorrerá flambagem local da alma (FLA), logo elas deverão ser dimensionadas utilizando as propriedades plásticas da seção mista. Neste trabalho essa limitação será seguida em todos os dimensionamentos de vigas mistas conforme a Equação 3.

Caso a viga não seja compacta, ela deverá seguir o cálculo utilizando as propriedades elásticas onde a flambagem local da alma ocorre, pois, a viga plastificou parcialmente, neste caso, a viga irá falhar devido ao próprio perfil de aço.

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}} \quad (3)$$

Em que:

h_w é a distância entre as faces internas das mesas nos perfis soldados (nos perfis laminados retira-se os dois raios de concordância entre a mesa e a alma);

t_w é a espessura da alma do perfil;

E_a é o módulo de elasticidade do aço;

f_y é a tensão de escoamento do aço.

Devido a rigidez proporcionada pela laje de concreto e a resistência dos conectores de cisalhamento, não deverá ocorrer a flambagem local da mesa (FLM) e a flambagem lateral por distorção (FLD) pois, conforme Piassi et. al., (2018), a FLD ocorre nas regiões de momentos negativos das vigas mistas contínuas e semicontínuas devido à compressão da mesa inferior e a tendência desta de flambar em relação ao seu eixo de maior inércia, já na análise de vigas simplesmente apoiadas, verifica-se que não há a atuação de momentos negativos, logo, a FLD não ocorrerá.

2.2.4 Largura efetiva

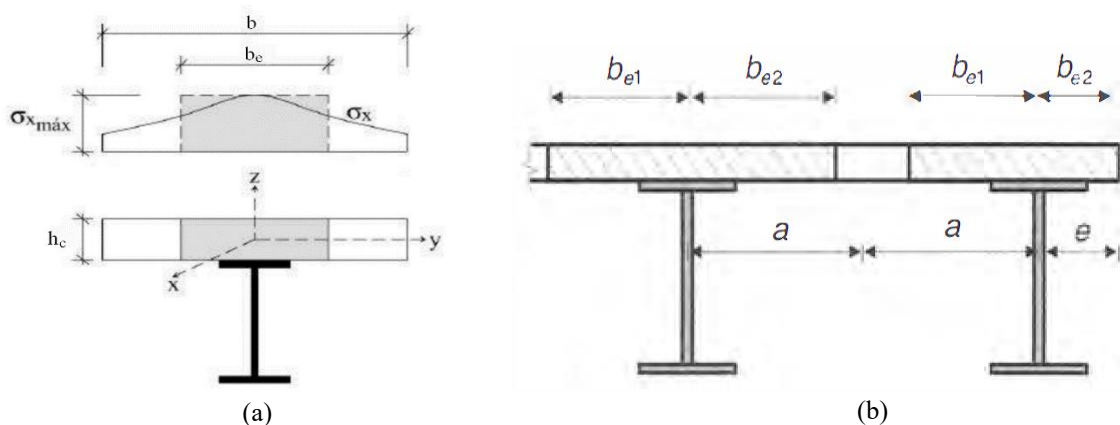
A largura efetiva da laje é uma largura fictícia da laje de concreto utilizada nos cálculos para o dimensionamento de vigas mistas, segundo Alva e Malite (2005) o conceito de largura efetiva permite considerar o efeito do “shear lag” que é a distribuição de tensões axiais na largura da laje conforme mostrado na Figura 2.4 (a). Sendo assim, não se pode considerar toda a laje de concreto como efetiva pois em partes ela não contribui com o momento fletor resistente da viga mista e nem com a rigidez efetiva do conjunto.

As considerações sobre o cálculo exato da largura efetiva, conforme Alva e Malite (2005), dependem de vários fatores tais como as condições de apoio, a distribuição dos momentos, a proporção entre a espessura da laje e a altura da viga e, por fim, a armadura longitudinal da laje de concreto.

No entanto, a NBR 8800 (ABNT, 2008) é conservativa quanto a este parâmetro e permite definir a largura efetiva da laje (b_e) para vigas biapoiadas como o menor dos seguintes valores ou da soma das parcelas:

- 1/4 do vão da viga mista, caso seja confirmada a presença de laje nos dois lados da viga, logo, 1/8 para cada lado saindo da linha de centro da viga mista;
- 1/2 da distância entre a viga analisada e a viga adjacente (a), de cada lado da viga mista e partindo da linha de centro;
- E no caso de uma laje de balanço, uma das parcelas é justamente o comprimento do balanço (e).

Na Figura 2.4 (b) é representada as duas parcelas b_{e1} e b_{e2} saindo de cada linha de centro da viga, na qual a soma delas corresponde a largura efetiva da laje (b_e).



Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2009)

2.2.5 Resistência ao momento fletor

Considerando a interação completa entre os elementos e a verificação da seção compacta da viga mista, o cálculo do momento resistente no estado limite último (ELU) pode ser realizado conforme a posição da linha neutra da seção plastificada na viga mista.

Para hipótese inicial da posição da linha neutra plástica (LNP), deve-se verificar a resistência máxima de compressão da laje de concreto e a resistência máxima a tração do perfil de aço através das Equações 4 e 5 (PFEIL; PFEIL, 2009).

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck} \cdot b_e \cdot h_c}{\gamma_c} \\ R_{td} = \frac{f_y \cdot A_p}{\gamma_{a1}} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \quad (5)$$

Em que:

R_{cd} é a resistência máxima de compressão;

b_e é a largura efetiva da laje de concreto;

h_c é a espessura da laje de concreto;

γ_c é o coeficiente de minoração de resistência do concreto;

R_{td} é a resistência máxima de tração;

A_p é a área do perfil;

γ_{a1} é o coeficiente de minoração de resistência do aço estrutural.

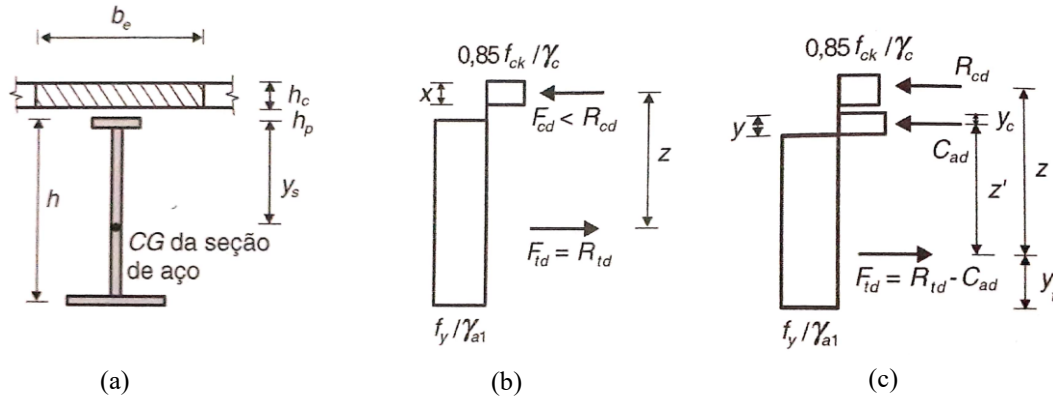
Através das componentes de resistência máxima de compressão e tração, pode-se identificar a posição da linha neutra nos elementos da viga mista. Desta forma:

Se $R_{cd} \geq R_{td}$, a linha neutra plástica estará na seção de concreto;

Se $R_{cd} < R_{td}$, a linha neutra plástica estará na seção de aço.

Além disso, a linha neutra se situará na interface entre a laje de concreto e o perfil de aço se os valores de R_{cd} e R_{td} forem iguais.

Figura 2.5 – (a) Parâmetros da viga mista; (b) Linha neutra plástica na laje de concreto; (c) Linha neutra plástica no perfil de aço



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.2.5.1 Linha neutra plástica na laje de concreto

Conforme a Figura 2.5 (b), quando $R_{cd} \geq R_{td}$, a posição da linha neutra pode ser expressa pela Equação 6:

$$x = \frac{f_y \cdot A_p / \gamma_{a1}}{0,85 \cdot f_{ck} \cdot b_e \cdot \gamma_c} \leq h_c \quad (6)$$

Em que:

x é a profundidade da linha neutra plástica na seção de concreto.

Logo, o momento resistente de cálculo é dado pela Equação 7:

$$M_{d \text{ res}} = R_{td} \cdot \left(y_s + h_p + h_c - \frac{x}{2} \right) \quad (7)$$

Em que:

y_s é a distância do centroide do perfil até a borda superior da mesa desse perfil;

h_p é a espessura da pré-laje pré-moldada de concreto ou a altura da nervura da forma de aço (se não houver nenhuma das duas, $h_p = 0$).

2.2.5.2 Linha neutra plástica no perfil de aço

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), quando $R_{cd} < R_{td}$, a posição da linha neutra está na mesa superior ou na alma do perfil metálico como mostrado na Figura 2.5 (c). Neste caso, considera-se que parte da seção de aço está sendo comprimida numa altura “y” da borda superior da mesa para que a resultante de compressão possa se igualar a resultante de tração. O valor da força de compressão resistente do perfil é calculado pela Equação 8:

$$C_{ad} = \frac{1}{2} \cdot (R_{td} - R_{cd}) \quad (8)$$

A posição da linha neutra no perfil metálico é determinada a partir da força de compressão no aço segundo as condições das Equações 9 e 10:

$$\text{Se } \left\{ \begin{array}{l} C_{ad} \leq f_y \cdot b_f \cdot \frac{t_f}{\gamma_{a1}} \rightarrow \text{Linha Neutra na Mesa} \rightarrow y = \frac{C_{ad}}{f_y \cdot b_f \cdot \gamma_{a1}} \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{ad} > f_y \cdot b_f \cdot \frac{t_f}{\gamma_{a1}} \rightarrow \text{Linha Neutra na Alma} \rightarrow y = \frac{C_{ad} - f_y \cdot b_f \cdot \gamma_{a1}}{f_y \cdot t_w \cdot \gamma_{a1}} + t_f \end{array} \right. \quad (10)$$

Em que:

C_{ad} é a força resistente de compressão no aço;

b_f é a largura da mesa do perfil;

t_f é a espessura da mesa do perfil;

y é a distância da linha neutra plástica até a face superior do perfil de aço.

Logo, o momento resistente de cálculo é dado pela Equação 11:

$$M_{d \text{ res}} = R_{cd} \cdot \left(h - y_t + h_p + \frac{h_c}{2} \right) + C_{ad} \cdot (h - y_t - y_c) \quad (11)$$

Em que:

h é a altura do perfil;

y_t é a distância do centroide da parte tracionada do perfil até a face inferior desse perfil;

y_c é a distância do centroide da parte comprimida do perfil até a face superior desse perfil.

2.2.6 Resistência ao esforço cortante

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), a força cortante resistente de cálculo de vigas mistas de alma cheia deve ser determinada considerando apenas a resistência do perfil de aço. Logo, a resistência ao cortante da viga mista irá depender apenas da plastificação da alma por cisalhamento do perfil metálico. Nos perfis compactos, objeto de estudo desse trabalho, ela pode ser dada pela Equação 13:

$$V_{d \text{ res}} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \cdot A_w \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (13)$$

Em que:

V_{pl} é a força cortante para plastificação da alma;

A_w é a área da alma, considerando a altura total do perfil metálico.

2.2.7 Definição do grau de interação e da quantidade de conectores

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), a quantidade de conectores de cisalhamento para se obter o tipo de interação dependerá do menor valor das resistências máximas de compressão e tração. Essa quantidade pode ser especificada através da Equação 12.

$$n_i = \frac{n \cdot Q_{Rd}}{F_{hd}} = \frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}} \quad (12)$$

Em que:

n_i é o grau de interação da viga mista (pode ser igual ou maior que 1,0 para interação completa e menor que 1,0 para interação parcial);

n é o número de conectores;

F_{hd} é a força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e da laje, tomado como o menor valor de resistência máxima seja a de compressão (R_{cd}) ou a de tração (R_{td}).

2.2.8 Determinação dos deslocamentos

As verificações dos estados limites de serviço analisam as deformações e vibrações excessivas que ocorrem nas vigas mistas e a fissuração do concreto sobre as regiões de momentos negativos.

Os deslocamentos ou flechas excessivas geralmente governam o dimensionamento de vigas mistas biapoiadas não escoradas (MACHADO, 2012). Na determinação dos deslocamentos das vigas mistas, é necessário levar em conta a sequência construtiva, o efeito da fluência e retração do concreto e a condição de resistência no caso de vigas com seção de aço compacta.

Higaki (2009) afirma que na construção de vigas mistas não escoradas, o peso próprio durante a concretagem da laje é resistido apenas pela viga metálica, sendo os deslocamentos calculados com o momento de inércia da seção de aço. Na construção escorada, a viga metálica não precisa resistir aos carregamentos antes da cura do concreto da laje, logo, o cálculo das flechas é feito somente com a utilização do momento de inércia da seção homogeneizada.

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), as propriedades das vigas mistas devem ser obtidas pela homogeneização da seção formada pelo aço do perfil e pela laje de concreto, com o objetivo de caracterizar os materiais por meio de um momento de inércia único. Para isso, a laje de concreto terá sua largura efetiva reduzida pela razão modular, conforme mostrado pela Equação 14.

$$\alpha_e = \frac{E_a}{E_c} \quad (14)$$

Em que:

α_e é a razão modular;

O aço é um material que possui uma elasticidade superior ao concreto, a combinação entre esses materiais permite o aumento considerável do módulo de inércia e a diminuição dos deslocamentos da estrutura. A equação 14, mostra a razão modular utilizada para os carregamentos de curta duração, já para os carregamentos de longa duração, os efeitos da fluência e da retração do concreto devem ser levados em conta, para isso a NBR 8800 (ABNT, 2008) permite a utilização da razão modular multiplicada por 3, sendo possível o cálculo dos deslocamentos provenientes das ações permanentes e variáveis ao longo do tempo.

O deslocamento total no meio do vão de vigas mistas simplesmente apoiadas pode ser calculado através da Equação 15:

$$\delta = \frac{5 \cdot q_k \cdot L^4}{384 \cdot E_a \cdot I_{ef}} \quad (15)$$

Em que:

q_k é o carregamento linear de serviço da viga;

L é o comprimento da viga.

I_{ef} é o momento de inércia da seção efetiva seja para ações de longa ou curta duração;

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), o carregamento de serviço utilizado para o cálculo da flecha dependerá da combinação de serviço adotada pelo responsável técnico do projeto, considerando as funções previstas para a estrutura, as características dos materiais e a sequência construtiva. Existem 3 tipos de combinações de serviço, as combinações quase-permanentes, as frequentes e as raras. Neste trabalho, decidiu-se adotar as combinações raras de serviço ao longo do tempo, onde considera-se que as ações de serviço possam causar danos permanentes a elementos e fissurá-los, sendo elas responsáveis por garantir maiores deslocamentos na estrutura.

2.2.8.1 Momento de inércia da seção homogeneizada

O cálculo do momento de inércia da seção mista homogeneizada pode ser feito através do cálculo das propriedades geométricas elásticas de cada elemento que a compõe, conforme a Tabela 2.1 (PFEIL; PFEIL, 2009).

Tabela 2.1 – Propriedades geométricas de vigas mistas em regimes elásticos

| Elemento | A_i | y' | $A_i \cdot y'$ | $A_i \cdot y'^2$ | I_0 | |
|----------|----------------------------------|---------------------|----------------|------------------|---|--|
| Laje | $\frac{b_e \cdot h_c}{\alpha_e}$ | $\frac{h_c}{2}$ | Calcular | Calcular | $\frac{(b_e \cdot h_c)^3}{12 \cdot \alpha_e}$ | |
| Perfil | A_p | $h_c + \frac{h}{2}$ | Calcular | Calcular | I_p | |
| Total | Soma | - | Soma | Soma | Soma | |

Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2009)

Onde a posição da linha neutra elástica (y_0) pode ser expressa pela Equação 16:

$$y_0 = \frac{\sum(A_i \cdot y')}{\sum A_i} \quad (16)$$

E o momento de inércia da seção mista homogeneizada ou transformada (I_{tr}) pela Equação 17:

$$I_{tr} = \sum I_0 + \sum (A_i \cdot y'^2) - \sum (A_i) \cdot y_0^2 \quad (17)$$

A NBR 8800 (ABNT, 2008) afirma que nas vigas mistas dimensionadas para a interação completa, é permitido utilizar somente a Equação 17, porém para a interação parcial utiliza-se um valor reduzido de momento de inércia da seção efetiva (I_{ef}), que procura expressar o deslizamento entre os elementos através do grau de interação, conforme mostra a Equação 18:

$$I_{ef} = I_p + \sqrt{n_i} \cdot (I_{tr} - I_p) \quad (18)$$

2.2.8.2 Deslocamentos máximos

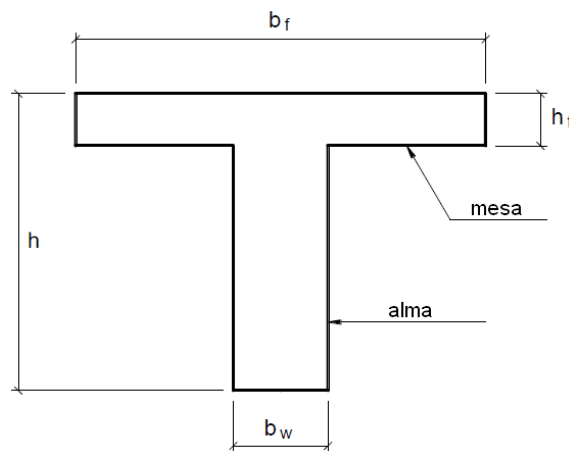
Os valores para os deslocamentos limites requeridos para situações usuais nas construções de aço e das estruturas mistas de aço e concreto estão previstos na Tabela C.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008), estes deslocamentos representam os valores máximos para que a estrutura não apresente problemas relacionados ao conforto dos usuários.

É considerado neste trabalho, a construção de vigas mistas de piso de pavimento, onde adota-se o valor limite para deformação (δ_{lim}) igual a $L/350$, sendo L neste caso o vão teórico entre os apoios.

2.3 Vigas de concreto armado de seção T

Segundo Silva (2017), as vigas de concreto armado podem assumir formatos geométricos além do retangular, como é mostrado na viga de seção T quando se considera a contribuição de lajes maciças apoiadas na viga de seção retangular. A viga como mostrada na Figura 2.6 possui a forma de um T e é constituída pela mesa e pela alma ou também chamada de nervura.

Figura 2.6 – Geometria típica da viga de seção T



Fonte: Modificado de Bastos (2019)

As vigas de seção T apresentam vantagens quando relacionadas as vigas simples de seção retangular devido ao trabalho conjunto com a laje de concreto, sendo que durante o esforço de compressão, as tensões são direcionadas longitudinalmente sobre a laje, o que proporciona uma menor altura necessária para resistir aos esforços de compressão. Logo, é possível a construção de vigas com menores alturas e que deformam menos quando comparadas as vigas retangulares (BASTOS, 2019).

Ainda segundo o autor, o dimensionamento das vigas de seção T, diferentemente das vigas mistas, são direcionados para o valor das armaduras que devem ser utilizadas para a seção resistir exatamente aos esforços solicitantes de cálculo ponderados, sejam eles o momento ou o cortante, e as condições necessárias para a segurança em serviço da viga, que consiste na verificação dos deslocamentos excessivos assim como feito anteriormente.

Os procedimentos de cálculo a seguir serão resumidos e servirão para determinar a geometria da viga e o quantitativo de aço a ser utilizado para que a viga resista aos estados limites últimos e de serviço.

2.3.1 Largura da mesa colaborante

Analogamente as vigas mistas, as vigas de concreto armado seção T possuem diretrizes para a consideração da largura colaborante da laje associada à viga. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), “A largura colaborante b_f deve ser dada pela largura da viga b_w acrescida de no máximo 10% da distância entre os pontos de momento fletor nulo, para cada lado da viga em que haja laje colaborante.”.

Para vigas biapoiadas, com lajes em ambos os lados da viga, a distância entre os pontos de momento nulo é igual ao comprimento da viga, sendo a largura colaborante da mesa dada geralmente pela Equação 19:

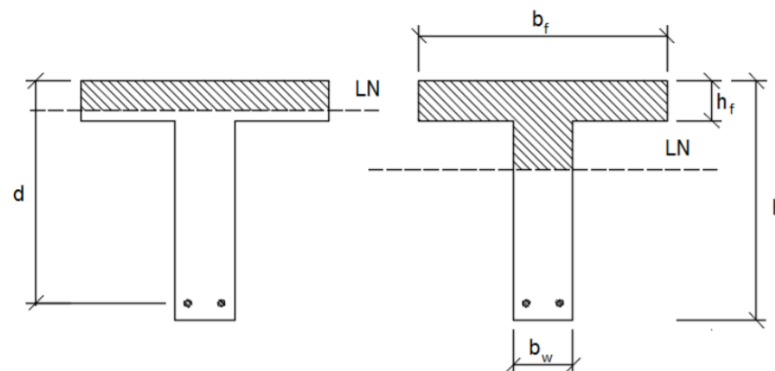
$$b_f = b_w + 0,2.L \quad (19)$$

2.3.2 Armadura longitudinal simples resistente ao momento fletor

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), o procedimento de cálculo para vigas de seção T continua sendo o mesmo para o dimensionamento de vigas de seção retangular, a diferença é que existem duas situações distintas para o cálculo: quando a linha neutra está situada na mesa ou então quando a linha neutra está situada na alma.

De acordo com Carvalho e Figueiredo (2014), no primeiro caso, na mesa, pode-se aplicar as mesmas equações para o dimensionamento de vigas retangulares, porém a largura utilizada para o cálculo não é a da alma da viga (b_w) e sim a da mesa colaborante da laje (b_f), pois considera-se que somente a laje de concreto irá resistir aos esforços de compressão.

Figura 2.7 – Posição da linha neutra na mesa e, em seguida, na alma da viga de seção T



Fonte: Carvalho e Figueiredo (2014)

As formulações do 1º caso para o cálculo da armadura longitudinal resistente a tração para concretos de f_{ck} menores ou iguais a 50 MPa (megapascal) são expressas pelas Equações 20, 21 e 22:

$$M_{d\ sol} = M_{d\ res} \quad (20)$$

$$M_{d\ res} = 0,68 \cdot b_f \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,4x) \quad (21)$$

$$A_s = \frac{M_{d\ res}}{f_{yd} \cdot (d - 0,4x)} \quad (22)$$

Em que:

$M_{d\ sol}$ é o momento de cálculo solicitante;

x é a posição da linha neutra;

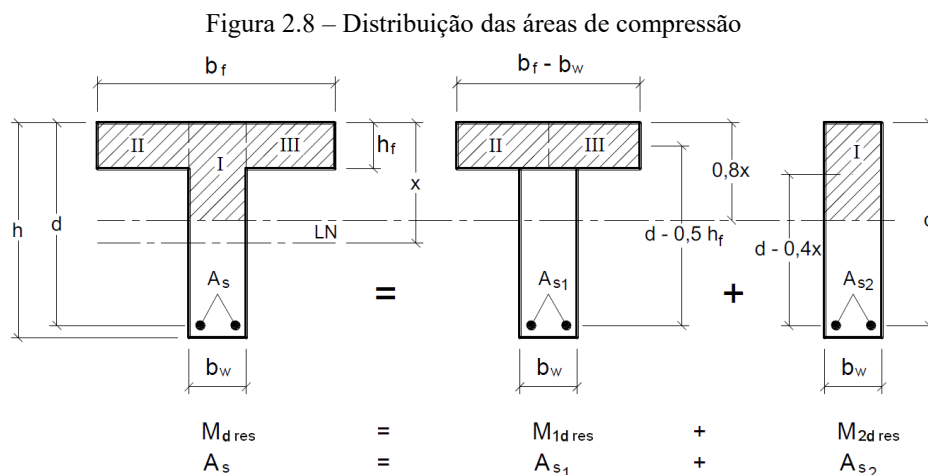
d é a altura útil;

A_s é a área transversal da armadura longitudinal de tração;

f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto a compressão;

f_{yd} é a resistência de cálculo do aço a tração.

Bastos (2019) afirma que quando a linha neutra passa pela alma temos que a área da mesa da laje colaborante não é suficiente para combater os esforços de compressão. Neste caso, deve-se efetuar uma composição das forças resultantes de compressão do concreto para as abas da mesa e para parte da alma até a profundidade da linha neutra.



Fonte: Modificado de Bastos (2019)

Ou seja, neste 2º caso, não se pode aplicar as mesmas formulações desenvolvidas para a seção retangular, sendo necessária a separação das áreas e dos momentos resistentes como mostrado na Figura 2.8 nas parcelas das abas da mesa da laje (1d) e da alma da viga até a linha neutra (2d), as formulações neste caso para concretos de f_{ck} menores ou iguais a 50 MPa são expressas pelas Equações 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29:

$$M_{d\ sol} = M_{d\ res} = M_{1d\ res} + M_{2d\ res} \quad (23)$$

$$M_{1d\ res} = (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,5h_f) \quad (24)$$

$$M_{2d\ res} = M_{d\ res} - M_{1d\ res} \quad (25)$$

$$M_{2d\ res} = 0,68 \cdot b_w \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,4x) \quad (26)$$

$$A_{s1} = \frac{M_{1d\ res}}{f_{yd} \cdot (d - 0,5h_f)} \quad (27)$$

$$A_{s2} = \frac{M_{2d\ res}}{f_{yd} \cdot (d - 0,4x)} \quad (28)$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (29)$$

As Equações 21 e 26 são utilizadas para determinação da posição da linha neutra quando se isola x . Para valores de x na Equação 21 menores que a espessura da laje, a viga é calculada segundo o procedimento do 1º caso, já para valores de x maiores que a espessura da laje, a viga segue os procedimentos do 2º caso, sendo necessário a verificação da posição real da linha neutra na alma pelo cálculo de x na Equação 26, quando considera-se que parte do momento solicitante foi resistido pelas abas da laje e o restante é resistido pela largura da alma da viga até a linha neutra.

Além disso, é necessário verificar o domínio onde a linha neutra se encontra, a relação x/d deve ser sempre menor que 0,45 para concretos de resistência a compressão igual ou inferiores a 50 MPa para que a viga permaneça entre os domínios de deformação 2 e 3 com

ductilidade. Nesse trabalho não será considerado a utilização de armaduras duplas, logo, a verificação anterior será sempre atendida nos dimensionamentos realizados.

2.3.3 Armadura transversal resistente ao esforço cortante

A NBR 6118 (ABNT, 2014) prescreve dois modelos de cálculo para o dimensionamento de estribos, a armadura transversal comum de vigas. O primeiro modelo admite as diagonais de compressão fixas numa inclinação de 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento viga, já o segundo modelo permite que o projetista adote uma inclinação entre 30° e 45° .

O primeiro modelo de cálculo é o adotado para o dimensionamento dos estribos neste trabalho. Nesse modelo considera-se a analogia da viga a uma treliça de banzos paralelos, em que se considera o papel dos estribos na resistência ao cortante, associado a mecanismos resistentes complementares, advindos da própria resistência natural da viga ao cortante. Segundo a norma, para que a resistência ao esforço cortante seja suficiente, é necessário que duas condições sejam satisfeitas, tais condições estão especificadas nas Equações 30 e 31:

$$\begin{cases} V_{d \text{ sol}} \leq V_{d2 \text{ res}} & (30) \\ V_{d \text{ sol}} \leq V_{d \text{ res}} = V_c + V_{sw} & (31) \end{cases}$$

Em que:

$V_{d \text{ sol}}$ é o esforço cortante de cálculo solicitante;

$V_{d2 \text{ res}}$ é o esforço cortante de cálculo resistente referente a falha das diagonais comprimidas de concreto;

$V_{d \text{ res}}$ é a força cortante de cálculo resistente referente a falha por tração diagonal;

V_c é a força cortante resistida pela geometria da viga;

V_{sw} é a força cortante resistida pela armadura transversal da viga.

A verificação da compressão da diagonal do concreto pode ser dada pela Equação 32:

$$V_{d2 \text{ res}} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (32)$$

$$\text{Onde } \alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \text{ com } f_{ck} \text{ expresso em MPa.} \quad (33)$$

A força cortante resistida pela geometria da viga (V_c) nos elementos sujeitos a flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção é dada pela Equação 34:

$$V_c = V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (34)$$

$$\text{Onde } f_{ctd} = \frac{0,21 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}}{\gamma_c} \text{ com } f_{ck} \text{ expresso em MPa.} \quad (35)$$

Logo, a força cortante resistente pela armadura transversal (V_{sw}) e a área ou seção transversal necessária por metro para resistir ao esforço cortante $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)$ são expressas pelas Equações 36 e 37:

$$V_{sw} = V_d \text{ res} - V_c \quad (36)$$

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right) = \frac{V_{sw}}{0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}} \quad (37)$$

Em que:

f_{ctd} é a resistência de cálculo do concreto a tração direta;

f_{ywd} é o a resistência a tração do aço na armadura transversal, geralmente é igual a f_{yd} e inferior a 435 MPa nos estribos.

2.3.4 Determinação dos deslocamentos

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define três estádios de deformação de uma viga de concreto armado, os estádios podem ser definidos resumidamente da seguinte forma:

O estágio I corresponde ao instante inicial da aplicação dos carregamentos em que a tensão de tração solicitante é inferior a resistência a tração do concreto. Além disso, neste estágio não se observa a aparição de fissuras de tração, pois o concreto ainda está trabalhando em regime elástico (NORONHA, 2015).

O estágio II ocorre quando o concreto não resiste mais as tensões de tração e fissura, o equilíbrio da seção só ocorre devido as armaduras longitudinais que resistem aos momentos

solicitantes. Neste estágio considera-se que apenas o aço resiste aos esforços de tração e que o processo de fissuração se intensifica à medida que o carregamento cresce (NORONHA, 2015).

Já o estágio III é alcançado quando as fissurações atingem a região comprimida da seção e a viga se encontra na iminência da ruptura devido a plastificação do concreto da região comprimida. Este estágio corresponde, analogamente, aos estados limites últimos, em que os esforços solicitantes atingem a capacidade resistiva da viga (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

Para o cálculo dos deslocamentos a NBR 6118 (ABNT, 2014) permite a utilização da adaptação da equação empírica de Branson (1996) que permite determinar a rigidez efetiva de qualquer seção transversal de uma viga em função do momento fletor atuante, das propriedades geométricas da seção e da resistência do concreto. A formulação de Branson (1996) descreve que a rigidez a flexão das vigas não é uma constante e ela pode ser utilizada para obter uma avaliação aproximada da flecha imediata de vigas. A expressão adaptada pela norma é dada pela Equação 38:

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \cdot \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_{II} \right\} \leq E_{cs} \cdot I_c \quad (38)$$

Em que:

M_r é o momento de fissuração do elemento estrutural;

M_a é o momento fletor máximo no vão;

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto ou do estágio I;

I_{II} é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II.

Considera-se que as estruturas de concreto armado trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre os comportamentos é definida pelo momento de fissuração ou o momento que ocasiona a primeira fissuração do concreto no estado limite de deformação excessiva, o cálculo dele pode ser dado pela Equação 39:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ctm} \cdot I_c}{\gamma_t} \quad (39)$$

Em que:

α é um fator de correlação de tração e possui valor igual a 1,2 para seções T;

f_{ctm} é a resistência média a tração direta do concreto;

y_t é a distância do centro de gravidade da viga de concreto à fibra mais tracionada.

De forma semelhante as vigas mistas, os deslocamentos imediatos nas vigas de concreto armado de seção T biapoiadas pode ser dado pela Equação 40:

$$\delta_i = \frac{5 \cdot q_k \cdot L^4}{384 \cdot (EI)_{eq}} \quad (40)$$

A NBR 6118 (ABNT, 2014) indica que as deformações decorrentes da fluência do concreto devem ser consideradas. A fluência é o fenômeno em que ocorre o aumento gradual da deformação de um elemento de concreto quando submetido a um estado de tensões ao longo do tempo (CARVALHO; FIGUEIREIDO, 2009). De acordo com a norma, a flecha diferida no tempo devido à fluência deve ser calculada pela multiplicação da flecha imediata pelo coeficiente α_f , que é expresso pela Equação 41:

$$\alpha_f = \frac{\Delta \varepsilon}{1 + 50p'} \quad (41)$$

Em que:

p' é a taxa de armadura de compressão;

$\Delta \varepsilon$ é a variação do coeficiente em função do tempo de aplicação das cargas.

A variação deste coeficiente ocorre da seguinte forma mostrada na Equação 42:

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon(t) - \varepsilon(t_0) \quad (42)$$

$$\varepsilon(t) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32} \text{ para } t \leq 70 \text{ meses}$$

$$\varepsilon(t) = 2 \text{ para } t > 70 \text{ meses} \quad (43 \text{ e } 44)$$

Onde t é o tempo em meses em que se deseja descobrir a flecha diferida no tempo e t_0 é o tempo em meses relativo à aplicação das cargas de longa duração, geralmente é igual ao tempo de escoramento das vigas.

Logo, a flecha total de vigas de concreto armado pode ser dada pela soma da flecha imediata e a flecha diferida no tempo, conforme a Equação 45.

$$\delta = (1 + \alpha_f) \cdot \delta_i \quad (45)$$

2.3.4.1 Momento de inércia da seção bruta

Em relação ao cálculo das propriedades geométricas das seções e utilizando as dimensões da Figura 2.6, pode-se determinar a posição do centro de gravidade das vigas de concreto armado de seção T pela Equação 46.

$$y_{cg} = \frac{b_w \cdot (h - h_f) \cdot \left(\frac{h - h_f}{2}\right) + b_f \cdot h \cdot \left(h - \frac{h_f}{2}\right)}{A_c} \quad (46)$$

E o momento de inércia da seção de concreto bruta é dado pela Equação 47.

$$I_c = \frac{b_w \cdot (h - h_f)^3}{12} + \frac{b_f \cdot h^3}{12} + b_w \cdot (h - h_f) \cdot \left(\frac{h - h_f}{2} - y_{cg}\right)^2 + b_f \cdot h \cdot \left(h - \frac{h_f}{2} - y_{cg}\right)^2 \quad (47)$$

2.3.4.2 Momento de inércia da seção fissurada no estágio II

O momento de inércia da seção fissurada no estágio II depende da posição da linha neutra, que neste estado difere da calculada anteriormente no item 2.3.2, pois considera-se que o concreto da região tracionada fatura e devido a isso a posição da linha neutra desce. Logo, é preciso verificar se a nova linha neutra está situada na mesa ou na alma da seção de concreto.

O cálculo da linha neutra no estágio II na mesa de concreto sem considerar a utilização de armaduras de compressão pode ser feito pela resolução da equação de 2º grau mostrada na Equação 48.

$$\left(\frac{b_f}{2}\right) \cdot x_{II}^2 + (\alpha_e \cdot A_s) \cdot x_{II} - (d \cdot \alpha_e \cdot A_s) = 0 \quad (48)$$

A razão modular (α_e) é calculada pela divisão do módulo de elasticidade do aço pelo módulo de elasticidade secante do concreto da mesma forma que nas vigas mistas.

Já o momento de inércia do estágio II para linha neutra na mesa de concreto pode ser calculado pela Equação 49.

$$I_{II} = \frac{b_f \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x_{II} - d)^2 \quad (49)$$

Quando o resultado positivo da equação 48 for superior a espessura da laje de concreto, a linha neutra do estágio II se situará na alma da viga de concreto armado de seção T e deve ser recalculada pela Equação 50.

$$\left(\frac{b_w}{2}\right) \cdot x_{II}^2 + (h_f \cdot (b_f - b_w) + \alpha_e \cdot A_s) \cdot x_{II} - \left(\left(\frac{h_f^2}{2}\right) \cdot (b_f - b_w) + d \cdot \alpha_e \cdot A_s\right) = 0 \quad (50)$$

O momento de inércia do estágio II para linha neutra na alma de concreto pode ser calculado pela Equação 51.

$$I_{II} = \frac{b_w \cdot x_{II}^3}{3} + \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot \left(x_{II} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x_{II} - d)^2 \quad (51)$$

2.3.4.3 Deslocamentos máximos

Os valores dos deslocamentos ou flechas limites para que os critérios de acessibilidade sensorial das vigas de concreto armado sejam atendidos estão previstos na Tabela 13.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Esse limite é adotado para prevenção de vibrações indesejadas ou efeito visual desagradável.

Neste trabalho, considera-se somente a limitação visual dos deslocamentos totais nas vigas de concreto armado, sendo assim, adota-se o valor limite para deformação (δ_{lim}) igual a $L/250$, sendo L o vão teórico entre os apoios.

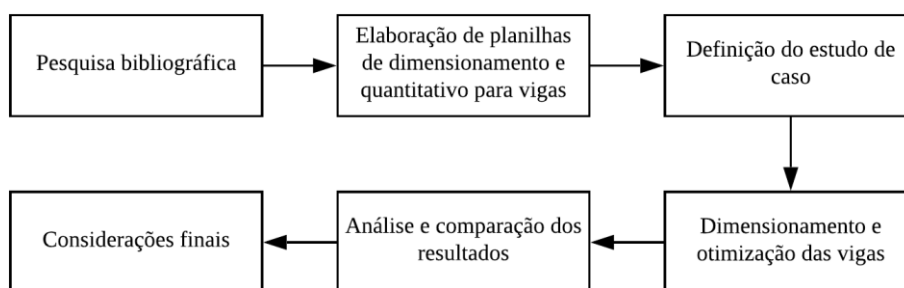
A norma ainda pontua que a deformação real das vigas de concreto depende de uma série de fatores como o processo construtivo, o grau de fissuração, as propriedades de fluência e retração do concreto, portanto pode-se esperar que o cálculo empírico ofereça algumas imprecisões quanto aos deslocamentos obtidos.

3 METODOLOGIA

3.1 Etapas da pesquisa

A metodologia pode ser definida como as instruções, etapas ou conceitos necessários para que os objetivos especificados sejam alcançados de maneira satisfatória. As etapas definidas na metodologia deste trabalho estão expressas na Figura 3.1 e descritas logo a seguir.

Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Autor

O trabalho teve como primeira etapa a pesquisa bibliográfica, onde foi realizado o estudo e aprofundamento sobre o assunto. Normas técnicas, bibliográficas direcionadas, manuais, dissertações e publicações foram analisados para o desenvolvimento do trabalho em todos os períodos até a sua concepção.

Definiu-se a rotina de dimensionamento para as vigas mistas e de concreto armado de seção T nos estados limites últimos e de serviço e através disso, foi elaborado planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel® para o cálculo e quantificação dos materiais utilizados.

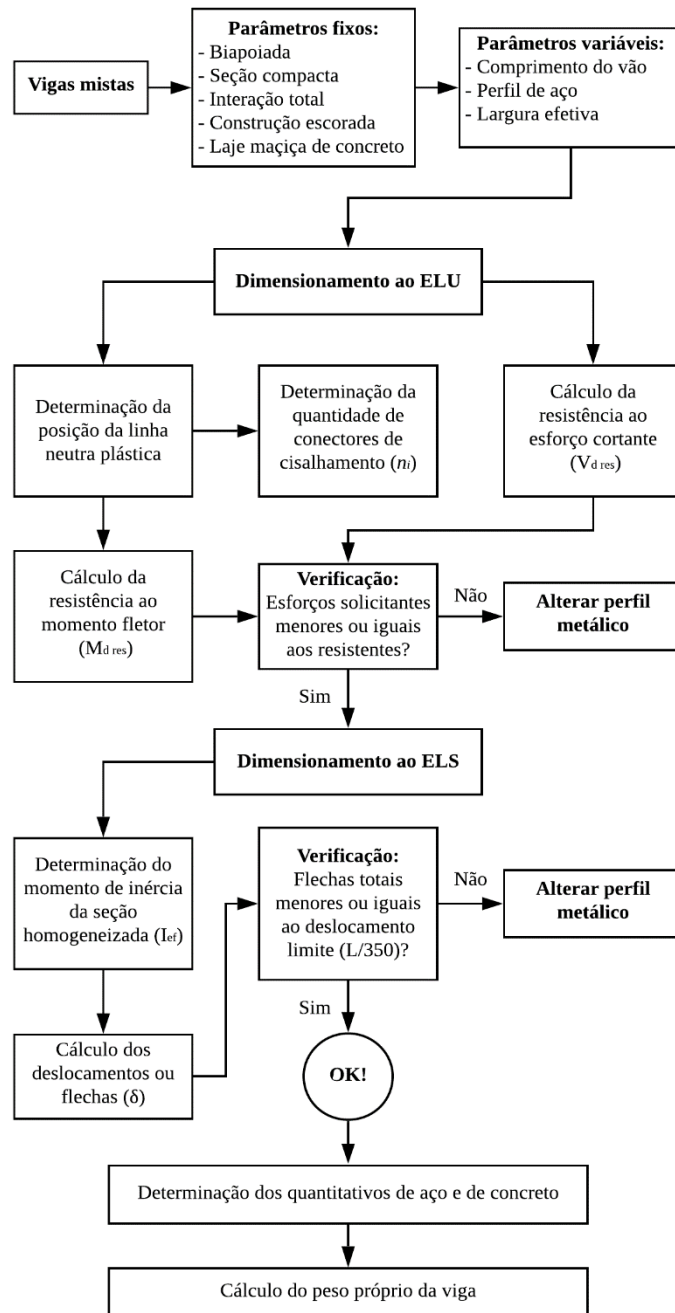
Como a pesquisa é de caráter exploratório, foi elaborado um estudo de caso visando a variação do comprimento do vão e a fixação de um carregamento linear para efetuar a análise de resultados e assim, definir os dados geométricos das vigas utilizadas para o dimensionamento e satisfação dos limites especificados.

Em seguida, foi feita a análise dos resultados, tendo em vista a verificação comparativa entre os dois tipos de viga. Além disso, análises adicionais também foram feitas para verificar alguns comportamentos das vigas mistas. Por fim, são elencadas as considerações finais sobre o estudo realizado.

3.2 Etapas do dimensionamento das vigas

O roteiro de cálculo das vigas mistas utilizado para confecção das planilhas eletrônicas pode ser descrito em várias etapas para que o dimensionamento satisfaça o ELU e o ELS e consiga fornecer os dados quantitativos dos materiais utilizados.

Figura 3.2 – Fluxograma das etapas do dimensionamento de vigas mistas



Fonte: Autor

Conforme mostrado na Figura 3.2, o procedimento de cálculo utilizado nas planilhas para as vigas mistas calcula inicialmente a posição da linha neutra e em seguida, a resistência ao momento fletor e ao esforço cortante junto a quantidade necessária de conectores de cisalhamento para garantir a interação completa. Enquanto outra parte efetua o cálculo das propriedades elásticas da seção mista para determinação do momento de inércia homogeneizado e, conseqüentemente, o deslocamento no meio do vão da viga.

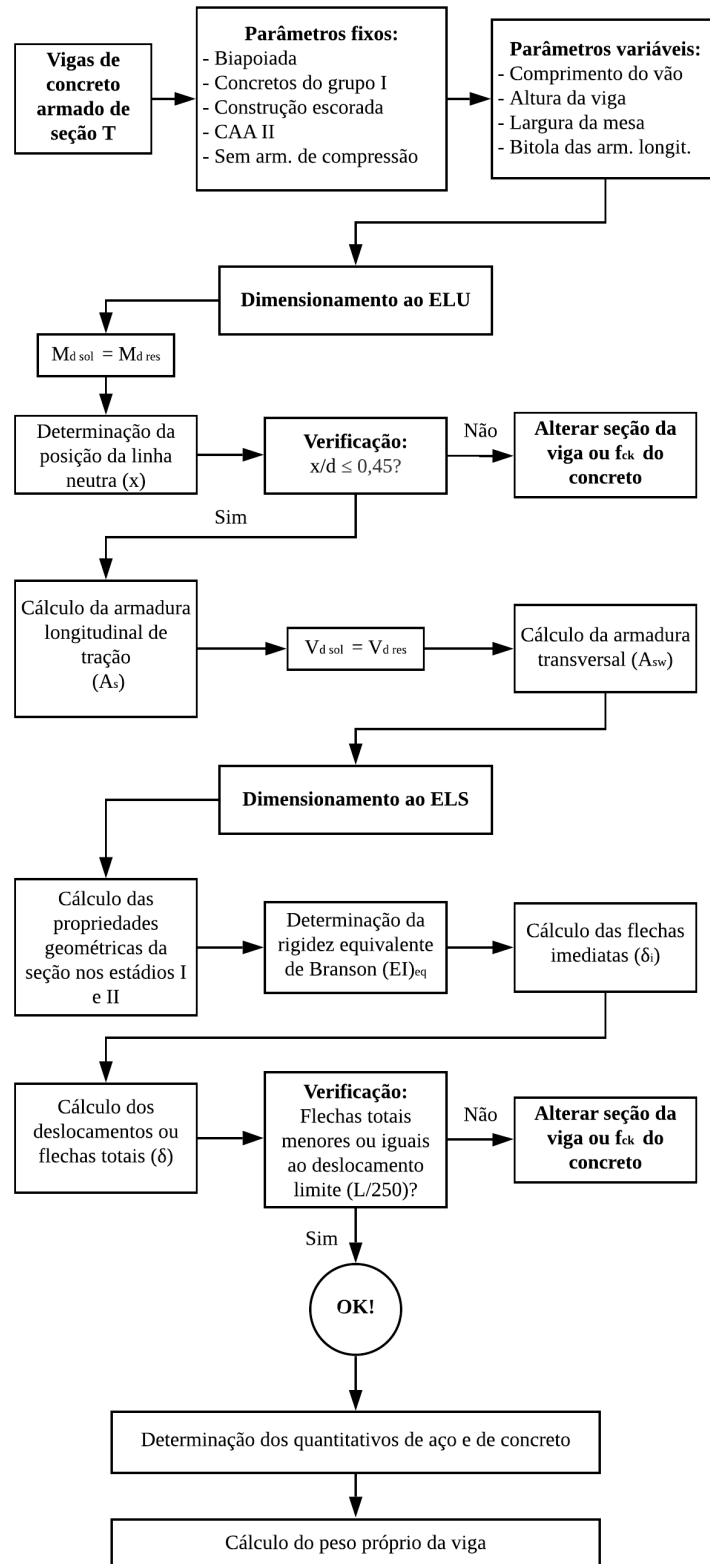
Nessas vigas os parâmetros variáveis são as considerações geométricas, que são dadas pelas dimensões do perfil metálico, a largura efetiva da laje de concreto e o comprimento do vão teórico.

O procedimento utilizado nas planilhas também desempenha o cálculo do quantitativo volumétrico de concreto da laje da viga mista, mas para efeitos comparativos, será considerado somente a parcela de concreto em cima da mesa superior do perfil metálico, desconsiderando as duas abas das lajes de concreto, pois essas são iguais tanto para as vigas mistas quanto para as vigas de concreto armado. Já o consumo de aço total nas vigas mistas é dado apenas pela contribuição do perfil.

Igualmente, considera-se o peso da viga mista sendo apenas a parcela da seção da alma, seguindo o mesmo pressuposto de que as abas das lajes de concreto são parâmetros constantes para os dois tipos de vigas e, assim, não servirão para quantificar a diferença de peso.

Por outro lado, é mostrado na Figura 3.3 o roteiro de cálculo das vigas de concreto armado de seção T utilizado para elaboração das planilhas eletrônicas foi feito conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) e permitiu a satisfação dos limites propostos como indicados anteriormente para as vigas mistas.

Figura 3.3 – Fluxograma das etapas do dimensionamento de vigas de concreto armado de seção T



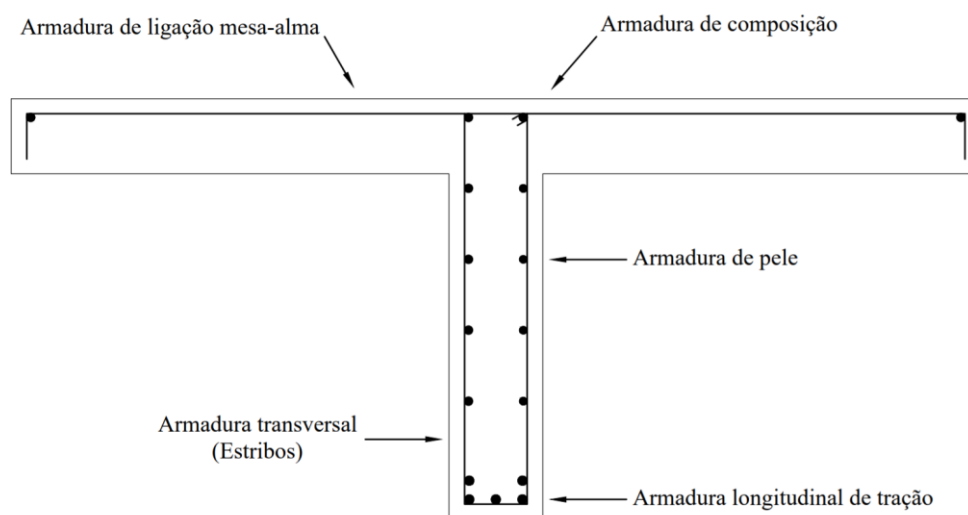
Fonte: Autor

O procedimento de cálculo utilizado nas planilhas das vigas de seção T verifica, a princípio, o domínio de deformação no estado limite último e, conseqüentemente, determina a posição da linha neutra na seção da viga para efetuar o cálculo do valor da área transversal da armadura longitudinal com finalidade de resistir ao momento fletor solicitante, em seguida, o procedimento para o dimensionamento das armaduras transversais resistentes ao esforço cortante solicitante é feito para o modelo de cálculo 1 vide o item 2.3.3. Enquanto isso, outra parte determina as propriedades geométricas no estágio I e II para o cálculo dos deslocamentos por meio da rigidez equivalente a flexão de Branson.

A altura da viga, a largura da mesa colaborante, a bitola das armaduras longitudinais e o comprimento do vão teórico foram os parâmetros variáveis utilizados no dimensionamento.

Na composição do quantitativo do consumo de aço total da viga de seção T foi utilizado as contribuições de várias armaduras especificadas na NBR 6118 (ABNT, 2014) como a armadura longitudinal de tração, a armadura de composição para amarração dos estribos, a armadura transversal, a armadura de ligação mesa-alma e a armadura de pele, que é utilizada para vigas de altura maior que 60 cm.

Figura 3.4 – Disposição do aço nas armaduras da viga “T”



Fonte: Autor

Na verificação do consumo volumétrico de concreto e do peso próprio da viga de seção T considerou-se somente a área da parcela retangular da seção total, desconsiderando as duas abas das lajes colaborantes.

3.3 Apresentação dos resultados

Os resultados dos dimensionamentos das vigas mistas para vários vãos serão representados de forma quantitativa da seguinte maneira: tipo de perfil utilizado, altura total das vigas, a razão entre os momentos fletores e esforços cortantes solicitantes pelo seu limite de resistência, o número de conectores, a razão entre o deslocamento calculado sobre o deslocamento limite, o consumo volumétrico de concreto, o consumo total de aço e o peso da alma da seção da viga.

Para as vigas de concreto armado de seção T também será apresentado alguns dos parâmetros anteriores e outros como a área de seção transversal de aço responsável pela resistência a tração, a bitola e o número de barras das armaduras longitudinais.

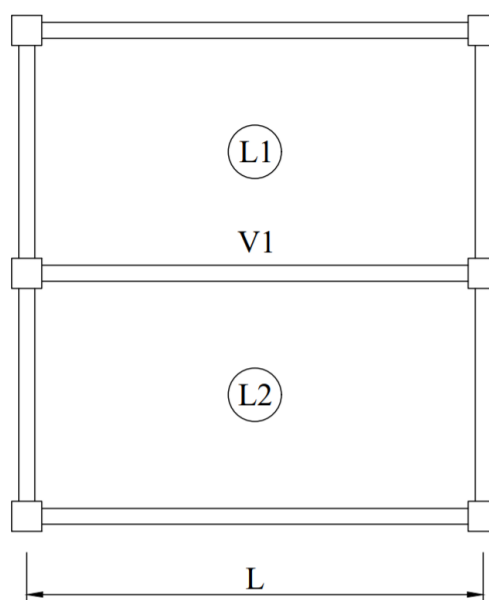
A discussão e o comparativo entre os resultados dos dois tipos de vigas são realizados de maneira quantitativa e qualitativa. Nesse tópico é abordado alguns parâmetros como a altura, o consumo de aço e de concreto, a posição da linha neutra e o peso da alma da viga. Por fim, será apresentado algumas análises adicionais sobre o comportamento das vigas mistas ao aproveitamento do carregamento solicitante em relação a capacidade resistiva.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Definição do estudo de caso

O estudo de caso neste trabalho consiste em dimensionar e comparar as vigas mistas e as vigas de concreto armado de seção T numa situação hipotética onde o comprimento da viga (L) é variado de 4 a 10 metros, valores que são usuais para vãos medianos a elevados em edifícios comerciais. Para isso assume-se que a viga analisada ($V1$) é biapoiada e recebe solicitações de duas lajes maciças de concreto ($L1$ e $L2$) conforme é mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Representação básica do estudo de caso

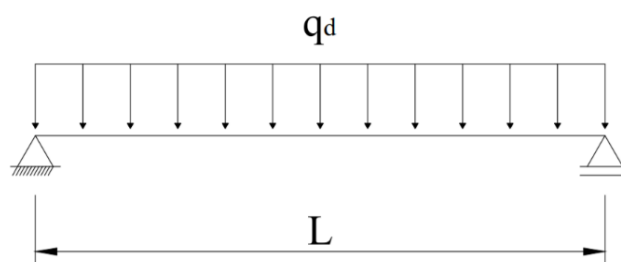


Fonte: Autor

4.2 Determinação do carregamento

Foi utilizado um carregamento linear fixo, conforme apresentado na Figura 4.2, tendo em vista a análise das vigas mistas e das vigas de concreto armado de seção T quando submetidas a esforços iguais, assim foi possível verificar os comportamentos de alguns parâmetros como a altura, o consumo de aço e de concreto e o peso de cada tipo de viga e compará-los sabendo que os dois tipos de vigas podem suportar o mesmo carregamento utilizado.

Figura 4.2 – Representação do carregamento da viga biapoiada



Fonte: Autor

Para determinação do carregamento linear fixo foi utilizada a planilha de cálculo das vigas mistas, porém ela foi modificada para permitir que o carregamento não fosse um parâmetro de entrada, e sim um dado de saída ou um resultado. Para isso o deslocamento calculado da viga foi igualado ao seu valor limite ($L/350$) e, através disso, pôde ser efetuado o procedimento de cálculo inverso e determinado o valor do carregamento linear quando a viga está quase ultrapassando o estado limite de serviço.

O carregamento linear foi dado pela viga mista de menor comprimento utilizando o menor perfil de aço disponível. Dentre os outros vãos, o menor vão da viga era o que possibilitaria o maior carregamento calculado, devido a limitação dos deslocamentos ao ELS.

Sendo assim, descobriu-se que 23 kN/m era o carregamento linear máximo que a viga mista de 4 metros poderia suportar sem ultrapassar o estado limite de serviço. Em seguida, utilizou-se o coeficiente de ponderação para as combinações no estado limite último igual a 1,4, o que determina o carregamento linear de cálculo (q_d) da Figura 4.2 igual a 32,2 kN/m.

Em valores práticos, esse carregamento corresponde a aplicação das seguintes cargas na viga mista de 4 metros:

- Cargas permanentes das lajes de concreto no valor de 5,0 kN/m²;
- Carga permanente de uma alvenaria de 13 kN/m³ de 3 metros de altura aplicada diretamente sobre a viga;
- Cargas acidentais das lajes de concreto igual a 2,5 kN/m², correspondente a sobrecarga usual de escritórios;
- Peso próprio da viga.

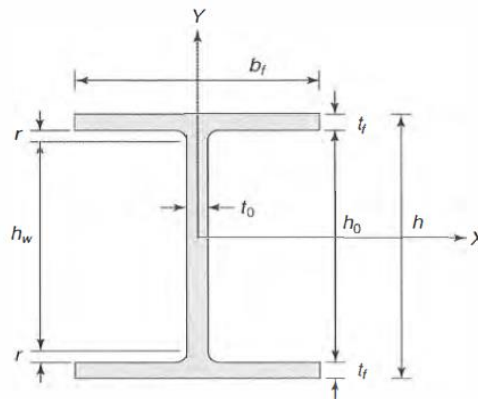
Assim, o carregamento calculado anteriormente foi utilizado para o dimensionamento de todas as vigas nos demais vãos utilizados.

4.3 Considerações de projeto

No dimensionamento das vigas mistas e das vigas de concreto armado de seção T foram utilizadas as seguintes considerações para os parâmetros iniciais de projeto.

- A laje é do tipo maciça e possui espessura de 12 cm para ambos os tipos de vigas. Esse valor de espessura permite o embutimento total dos conectores de cisalhamento das vigas mistas mais a sobra mínima de 1 cm especificada na NBR 8800 (ABNT, 2008). A largura efetiva das vigas mistas e a largura da mesa colaborante das vigas de concreto armado seguem os critérios normativos vide os itens 2.2.4 e 2.3.1.
- A resistência a compressão do concreto das lajes das vigas possui valor igual a 25 MPa e está submetido a classe de agressividade ambiental II, além disso o peso específico adotado para o concreto é de 25 kN/m³.
- A Figura 4.3 representa os perfis de aço adotados para as vigas mistas são os perfis laminados W (tipo I) de dupla simetria do catálogo comercial de bitolas dos perfis estruturais da Gerdau S.A. e o aço utilizado é o AR350 que possui tensão de escoamento de 350 MPa e todos os perfis apresentam seções compactas. O aço dos perfis utilizados possui módulo de elasticidade igual a 200 GPa. A denominação dos perfis é feita no estilo W “Altura em mm” x “Peso linear em kg/m” como exemplo: W 150 x 13,0.

Figura 4.3 – Representação do perfil de aço W e de suas dimensões



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

- A largura da alma da viga de concreto armado de seção T foi fixada em 15 cm. Enquanto que nas vigas mistas, a largura variou devido a escolha do perfil metálico.
- As armaduras utilizadas na viga de concreto armado são em aço do tipo CA-50 e possuem módulo de elasticidade de 200 GPa. O diâmetro máximo dos vergalhões ficou restrito a 20 mm para que o espaçamento horizontal seja maior que o mínimo permitido pela NBR 6118 (ABNT, 2014).
- Os conectores de cisalhamento utilizados foram o tipo pino com cabeça de diâmetro de 19 mm e possuem resistência última de ruptura de 415 MPa. A quantidade de conectores foi definida de forma que seja garantida a interação completa entre os elementos da viga mista.
- Considera-se que as vigas dimensionadas são escoradas durante 28 dias. O limite de deslocamento das vigas mistas é igual a $L/350$ e é considerado que as ações de serviço atuam ao longo do tempo. Já o limite de deslocamento das vigas de concreto armado é igual a $L/250$ e considera-se a flecha total sendo a composição da flecha imediata após a retirada do escoramento mais a flecha diferida no tempo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Dimensionamento das vigas mistas

A seguir serão apresentadas as tabelas dos resultados do dimensionamento de vigas mistas com os vãos variáveis de 4 a 10 metros.

As iterações para escolha do perfil metálico foram feitas de forma a atender o ELU, em que os esforços solicitantes devem ser menores ou iguais aos resistentes, e o ELS, em que a flecha calculada para os esforços de longa duração não pode ultrapassar o deslocamento limite.

O dimensionamento iterativo pôde ser dividido em duas categorias ou modelos que dizem respeito a como foi dado o ajuste do perfil metálico de maneira otimizada.

No primeiro modelo (Tabela 5.1), os perfis metálicos foram escolhidos de acordo com o seu peso linear, que deve ser o menor possível para satisfazer as condições adotadas e como resultado tem-se seções de aço mais leves, porém mais altas.

Tabela 5.1 – Vigas mistas otimizadas pelo peso do perfil metálico

| Vão (m) | Perfil de aço | H (cm) | Md sol/res | Vd sol/res | Nº de conectores | δ/δ_{lim} | Vc (m ³) | Consumo total de aço (kg) | Peso da alma da viga (kgf) |
|---------|---------------|--------|------------|------------|------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | W 150 x 13,0 | 26,8 | 69% | 53% | 6 | 99% | 0,05 | 52,0 | 172 |
| 5 | W 250 x 17,9 | 37,1 | 61% | 35% | 9 | 75% | 0,06 | 89,5 | 241 |
| 6 | W 310 x 21,0 | 42,3 | 66% | 33% | 10 | 84% | 0,07 | 126,0 | 308 |
| 7 | W 360 x 32,9 | 46,9 | 55% | 29% | 16 | 73% | 0,11 | 230,3 | 497 |
| 8 | W 410 x 38,8 | 51,9 | 55% | 26% | 19 | 74% | 0,13 | 310,4 | 646 |
| 9 | W 410 x 46,1 | 52,3 | 59% | 27% | 22 | 89% | 0,15 | 414,9 | 793 |
| 10 | W 460 x 52 | 57,0 | 60% | 25% | 24 | 91% | 0,18 | 520,0 | 976 |

Fonte: Autor

Nota-se na Tabela 5.1 que o número de conectores quadruplicou entre o menor e o maior vão. Esse acréscimo se dá devido ao aumento da área de aço do perfil a cada vez que o vão é elevado, para que seja possível resistir à força cisalhante solicitante.

Por outro lado, nas iterações para o segundo modelo (Tabela 5.2) escolheu-se as seções de aço conforme a sua altura, que deve ser considerada como a menor possível para satisfazer as condições de projeto, nesse caso foi possível adotar seções mais baixas, porém mais robustas e de maior consumo de aço.

Tabela 5.2 – Vigas mistas otimizadas pela altura do perfil metálico

| Vão (m) | Perfil de aço | H (cm) | Md sol/res | Vd sol/res | Nº de conectores | δ/δ_{lim} | Vc (m³) | Consumo total de aço (kg) | Peso da alma da viga (kgf) |
|---------|---------------|--------|------------|------------|------------------|-----------------------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | W 150 x 13,0 | 26,8 | 69% | 53% | 6 | 99% | 0,05 | 52,0 | 172 |
| 5 | W 200 x 19,3 | 32,3 | 63% | 36% | 10 | 94% | 0,06 | 96,5 | 250 |
| 6 | W 250 x 25,3 | 37,7 | 62% | 32% | 12 | 92% | 0,07 | 151,8 | 335 |
| 7 | W 250 x 38,5 | 38,2 | 56% | 34% | 18 | 98% | 0,12 | 269,5 | 578 |
| 8 | W 310 x 44,5 | 43,3 | 57% | 33% | 21 | 96% | 0,16 | 356,0 | 754 |
| 9 | W 360 x 51 | 47,5 | 59% | 30% | 24 | 99% | 0,18 | 459,0 | 921 |
| 10 | W 410 x 60 | 52,7 | 57% | 27% | 28 | 95% | 0,21 | 600,0 | 1134 |

Fonte: Autor

Observa-se nas Tabelas 5.1 e 5.2 que tanto o momento fletor quanto o esforço cortante solicitantes de cálculo ficaram bem abaixo da capacidade total de resistência da viga, numa razão que variou entre 55 a 69% para o momento e entre 25 a 53% para o cortante.

Ambos os parâmetros não foram otimizados, pois os deslocamentos limitaram o dimensionamento, devido a isso utilizou-se perfis que possuíssem maior momento de inércia para garantir rigidez a flexão da viga. O acréscimo da inércia das vigas mistas se dá principalmente pelo aumento da altura do perfil. Já quando é indesejável aumentar a altura, como na situação de otimização por menores alturas de perfis, altera-se as outras dimensões para obter uma maior área de seção de aço a custo do aumento do peso do perfil metálico.

Na maioria dos resultados observa-se que o deslocamento ficou bem próximo ao seu limite, principalmente nas vigas com a altura otimizada, possuindo a razão δ/δ_{lim} acima de 90% da flecha limite. No entanto, nas vigas mistas otimizadas pelo peso do perfil observa-se variações abaixo de 90% do deslocamento limite nos vãos de 5 a 9 metros, nesses casos a seção de aço não pôde ser otimizada devido a inexistência de perfis comerciais intermediários mais leves na tabela de bitolas da Gerdau S.A.

5.2 Dimensionamento das vigas de concreto armado de seção T

De modo semelhante as vigas mistas, será mostrado na Tabela 5.3 os resultados do dimensionamento das vigas de seção T para vãos variáveis de 4 a 10 metros.

As iterações foram feitas para que o valor calculado da flecha total seja menor que o deslocamento limite, no entanto, para o restante do dimensionamento do ELU considera-se que o momento fletor e esforço solicitante de cálculo, ou seja, as solicitações majoradas pelo

coeficiente de segurança das combinações últimas, sejam iguais a capacidade resistiva da viga. A altura total da viga (H) foi o principal parâmetro variado para satisfazer as condições do ELS.

Tabela 5.3 – Vigas de concreto armado de seção T

| Vão (m) | H (cm) | As - Tração (cm ²) | Bitola (mm) | Nº de barras | δ/δ_{lim} | V _c (m ³) | Consumo total de aço (kg) | Peso da alma da viga (kgf) |
|---------|--------|--------------------------------|-------------|--------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | 40,0 | 4,07 | 12,5 | 4 | 96% | 0,24 | 25,9 | 600 |
| 5 | 49,0 | 5,10 | 12,5 | 5 | 95% | 0,37 | 38,9 | 919 |
| 6 | 56,0 | 6,37 | 16 | 4 | 98% | 0,50 | 58,2 | 1260 |
| 7 | 67,0 | 7,16 | 16 | 4 | 97% | 0,70 | 80,9 | 1759 |
| 8 | 74,0 | 8,43 | 16 | 5 | 98% | 0,89 | 114,7 | 2220 |
| 9 | 80,0 | 9,83 | 20 | 4 | 98% | 1,08 | 150,6 | 2700 |
| 10 | 91,0 | 10,61 | 20 | 4 | 98% | 1,37 | 170,3 | 3413 |

Fonte: Autor

Percebe-se, pela análise da Tabela 5.3, que foi possível aproximar o dimensionamento das vigas ao ELS, pois os deslocamentos estão bem próximos do seu limite e, além disso, foram utilizados somente três diâmetros de bitolas com intuito de uniformizar a quantidade de barras em 4 ou 5, divididas em duas camadas na seção da alma da viga.

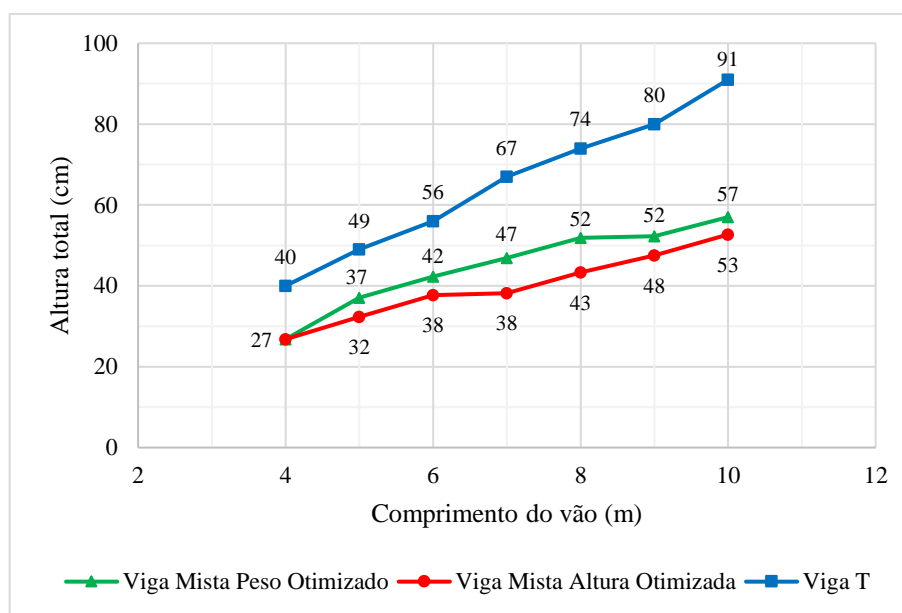
Todas as vigas dimensionadas ficaram entre os limites do domínio 2, assim, o ELU só é atingido devido a deformação plástica excessiva da armadura de modo semelhante a plastificação dos perfis metálicos nas vigas mistas.

5.3 Comparações entre os dois tipos de vigas

5.3.1 Altura

A Figura 5.1 representa as comparações entre as alturas totais para que as vigas mistas e de concreto armado de seção T possam satisfazer tanto os estados limites últimos quanto os estados limites de serviço.

Figura 5.1 – Comparativo entre a altura das vigas mistas e das vigas de concreto armado de seção T



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 5.1 o aumento praticamente linear da altura da viga em todas as situações propostas, sendo que o coeficiente angular da reta das vigas de concreto armado (Viga T) é cerca de 2 vezes maior que o das vigas mistas de menor altura (Viga Mista Altura Otimizada) e 1,7 vezes maior que o das vigas mistas de menor peso (Viga Mista Peso Otimizado). Assim, considera-se que a diferença entre a altura das vigas mistas em relação a vigas de concreto armado cresce consideravelmente com o aumento do comprimento do vão.

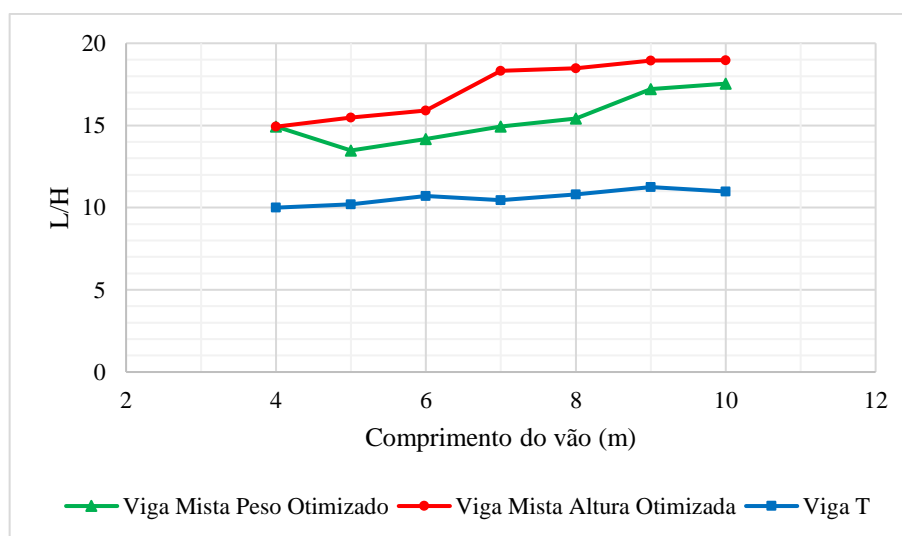
Uma justificativa para essa diferença e o melhor desempenho das seções mistas é devido a rigidez do conjunto, que é muito superior quando comparada as vigas de concreto armado. O perfil metálico possui, além de uma elasticidade elevada, um módulo de inércia que aproveita as condições geométricas da seção por ser vazada e possuir o formato de I, logo, ele permite que a viga quando submetida a grandes tensões deforme menos, enquanto isso, a laje de concreto contribui ainda mais na rigidez e desfavorece a ocorrência de flambagens como a flambagem lateral por torção, que é uma das principais causas limitantes do dimensionamento de vigas puramente metálicas. Por sua vez, o perfil metálico é a área de aço responsável pela resistência a tração das vigas mistas e ele é cerca de 3 a 6 vezes maior que a área da seção das barras longitudinais das vigas de concreto armado, o que possibilita a redução do braço de alavanca entre as componentes de tração e compressão, responsáveis pelo momento resistente das vigas e pela redução da altura total.

Comparando as vigas mistas e as de concreto armado, é possível reduzir em 13 cm a altura de uma viga de 4 metros quando opta-se por utilizar uma viga mista, já para 10 metros

a redução pode chegar a 34 ou até 38 cm de altura dependendo do tipo da otimização do perfil metálico. Em valores proporcionais, a utilização do método construtivo das vigas mistas em relação a vigas de concreto armado pode reduzir a altura total de uma viga numa média de 39% quando otimizadas pela altura e 31% quando otimizadas pelo peso do perfil. No vão de 7 metros, observa-se a maior diminuição percentual de altura das vigas, de 67 para 38 cm, contabilizando 43% de redução, que foi ocasionada pela utilização do perfil mais otimizado para aquela situação.

Entre as vigas mistas dimensionadas, observa-se que a redução de altura varia entre 4 e 9 cm e em média é possível reduzir a altura em 11% considerando a escolha de perfis metálicos mais baixos e robustos ao invés de mais leves. Outra forma de representar o ganho de altura devido a utilização de vigas mistas é mostrada na Figura 5.2 que expressa o desenvolvimento da razão entre o comprimento e a altura da viga (L/H) quando é variado o próprio vão.

Figura 5.2 – Relação entre o comprimento do vão sobre a altura das vigas dimensionadas



Fonte: Autor

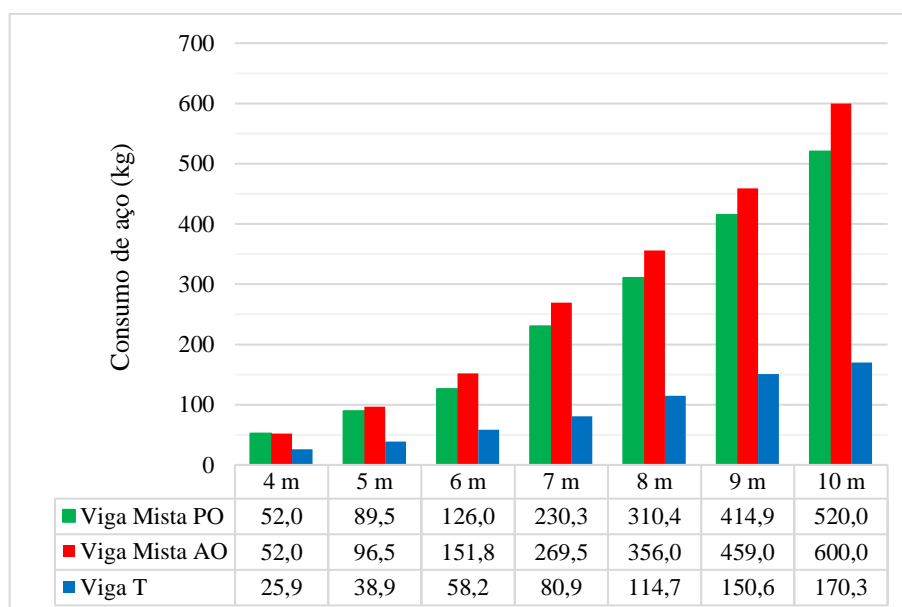
A Figura 5.2 mostra que as relações L/H para as vigas de concreto armado de seção T variam entre 10 e 11 e são quase que constantes com o acréscimo do comprimento do vão e, esses valores são semelhantes ao que é utilizado no pré-dimensionamento da altura de vigas de concreto armado biapoiadas quando se analisa um vão qualquer (ALVA, 2007). Já para as vigas mistas observa-se que essa relação cresce, de 15 no menor vão para até 19 no maior vão, o que representa um ganho proporcional na eficiência da altura da viga mista quando resolve-se avaliar vão maiores.

Este tipo de solução garante vantagens expressivas nos edifícios comerciais, onde a redução da altura dos elementos estruturais pode acarretar na construção de mais pavimentos ou no melhor aproveitamento do pé direito dos espaços.

5.3.2 Consumo de aço e de concreto

Conforme a Figura 5.3, percebe-se que o quantitativo do consumo de aço para os dois tipos de vigas com o desenvolvimento do vão apresenta valores consideravelmente diferentes.

Figura 5.3 – Consumo de aço das vigas dimensionadas



Fonte: Autor

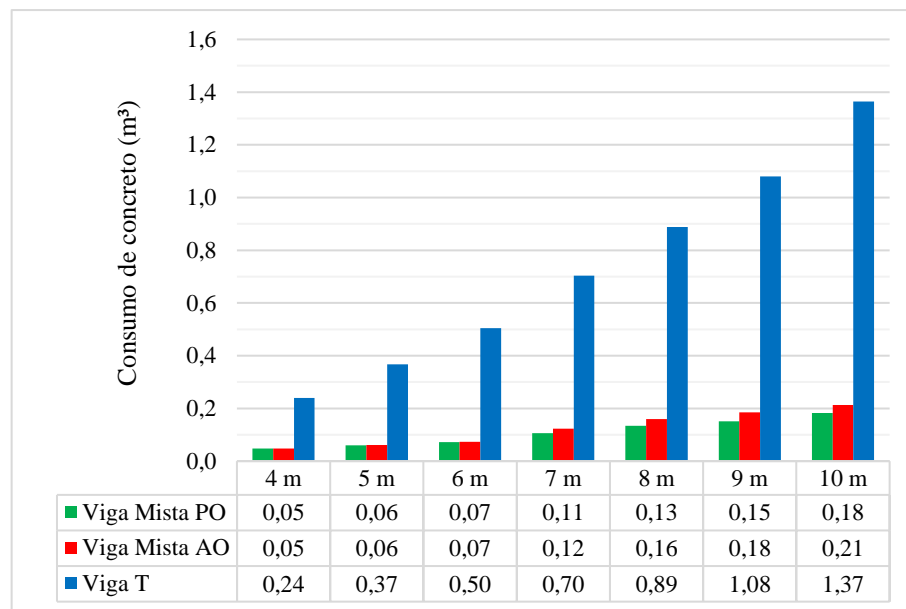
Nas vigas mistas observa-se que o consumo de aço em relação aos 2 modelos de otimização, peso otimizado (Viga Mista PO) e altura otimizada (Viga Mista AO), não aumenta consideravelmente. Em média, tem-se que os dimensionamentos de vigas mistas de perfis metálicos de menor altura apresentam um acréscimo no consumo de aço de 14% em relação as vigas mistas de perfis de maior altura. Tendo em vista a análise do item 5.3.1 e as duas categorias de otimização, pode-se dizer que, em média, o aumento do consumo de aço em 14% pode beneficiar a redução da altura da viga mista em 11%.

A diferença quantitativa entre os modelos de otimização para as vigas mistas de 10 metros é de 80 kg de aço, observa-se que com essa quantidade de aço pode-se produzir outra viga mista de 4 metros. Tendo em vista situações reais de projeto sempre é necessário avaliar as vantagens acarretadas pela economia de material.

A diferença é realmente considerável quando se resolve analisar o quantitativo entre os 2 tipos de vigas onde é observado que o consumo de aço das vigas mistas é sempre superior. No vão de 4 metros, as vigas mistas consomem 2 vezes mais aço que as vigas de concreto armado de seção T, já para o vão de 10 metros o consumo fica cerca de 3 a 3,5 vezes maior. Caso fosse adotado no dimensionamento a adição de contraflechas nos perfis metálicos seria possível diminuir o consumo de aço das vigas mistas e reduzir a folga do dimensionamento entre os momentos solicitantes e resistentes observado no item 5.1.

A Figura 5.4 mostra o consumo de concreto utilizado nas vigas conforme as considerações feitas no item 3.2.

Figura 5.3 – Consumo de concreto das vigas dimensionadas



Fonte: Autor

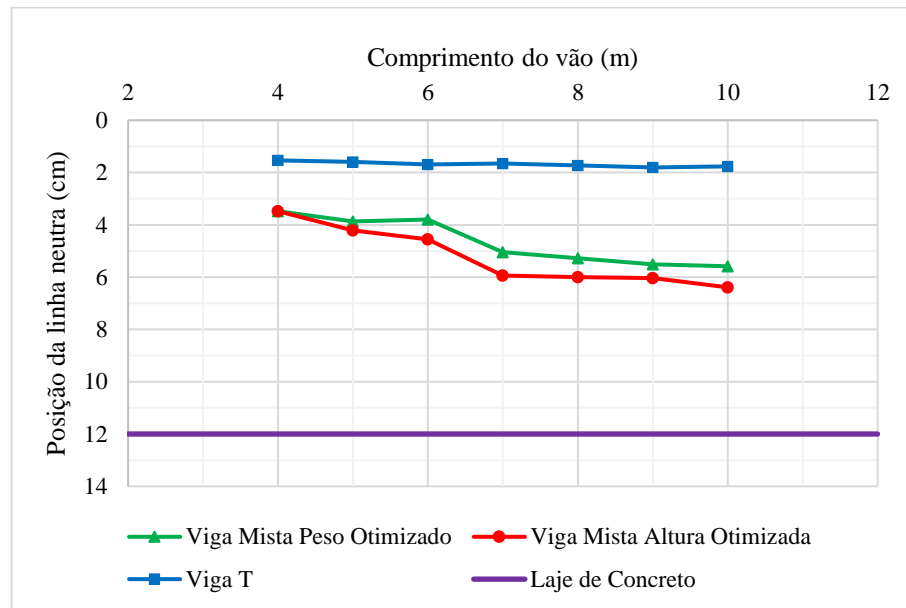
Na Figura 5.4 nota-se que a maior diferença entre o consumo nos dois modelos de vigas mistas é cerca de 0,03 m³, por ser um valor insignificante, pode ser considerado que elas consomem praticamente o mesmo volume de concreto. Já o consumo de concreto das vigas “T” é cerca de 5 a 7 vezes superior ao consumo de concreto das vigas mistas.

Observa-se que uma viga mista de 10 metros não chega a consumir o volume de concreto necessário na concretagem da alma de uma viga de concreto armado de seção T de 4 metros. Por outro lado, enquanto que nas almas das vigas de seção T é necessário conter o concreto nas fôrmas de madeira, nas almas das vigas mistas não é preciso a utilização de fôrmas devido ao perfil metálico.

5.3.3 Posição da linha neutra

A Figura 5.5 aborda a posição da linha neutra nas vigas mistas e nas vigas de concreto armado de seção T junto a espessura de 12 cm da laje de concreto utilizada nos dois tipos vigas.

Figura 5.5 – Posição da linha neutra nas vigas dimensionadas



Fonte: Autor

Observa-se na figura 5.5 que a linha neutra de todas as vigas dimensionadas se situa na laje de concreto, pois todos os valores das posições da linha neutra são inferiores a espessura adotada para a laje. Entende-se que acima da linha neutra a região é comprimida e abaixo dela a seção é tracionada.

Percebe-se que nas vigas de concreto armado a linha neutra permanece constante e a região de concreto comprimida é mínima (no máximo 2 cm da laje). Já nas vigas mistas a linha neutra desce quase que linearmente com o crescimento do vão, o que propicia o aumento na eficiência das propriedades mecânicas do aço e do concreto.

Esse comportamento pode ser explicado pela mudança dos perfis metálicos para outros mais robustos com o decorrer do vão, tanto que no modelo onde a altura é otimizada, os perfis utilizados são mais pesados e possuem maiores seções de aço, conseqüentemente, a linha neutra desce levemente quando comparada ao modelo de peso otimizado.

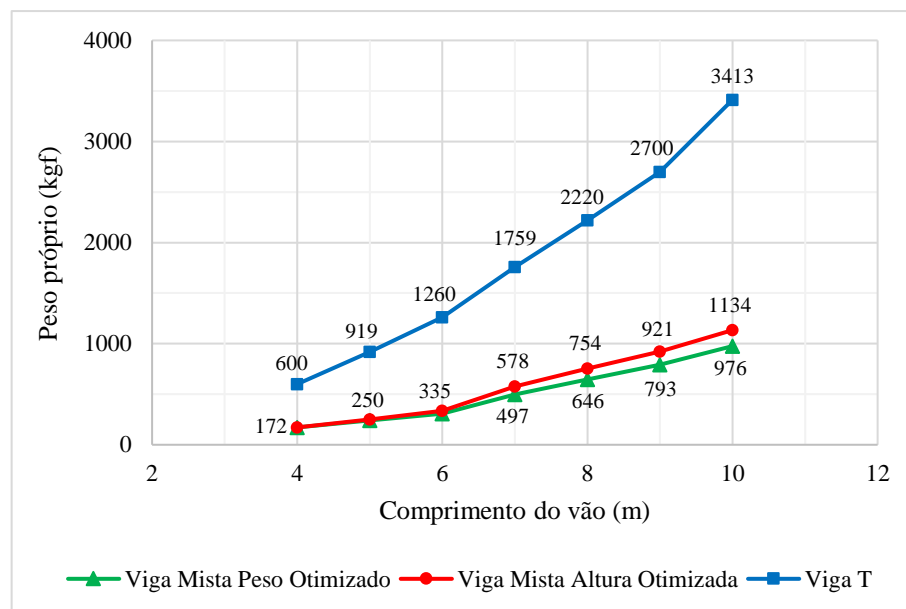
Devido ao menor consumo de concreto e ao maior consumo de aço, as vigas mistas possuem proporcionalmente uma menor área de concreto tracionado em relação as vigas de

concreto armado de seção T e, observa-se que o perfil de aço nas vigas mistas dimensionadas se encontra totalmente tracionado, pois as linhas neutras permaneceram na laje de concreto. Como o concreto não é um material feito para trabalhar com a tração, é evidente dizer que as vigas “T” apresentam consideráveis desvantagens por apresentarem almas de concreto completamente tracionadas e, conseqüentemente, sujeitas a fissuração.

5.3.4 *Peso próprio*

A figura 5.6 representa o peso próprio da alma das vigas mistas e de concreto armado de seção T conforme a variação do vão.

Figura 5.6 – Peso próprio das vigas dimensionadas



Fonte: Autor

Na figura 5.6, observa-se a relação entre os dois modelos de vigas mistas para os vãos de 10 metros em que a diferença entre as otimizações é de apenas 158 kg. Como o consumo de aço e de concreto visto no item 4.5.2 dos dois modelos foi semelhante, a diferença entre os pesos dos modelos das vigas mistas também não apresenta valores significativos. Por outro lado, as vigas de concreto armado de seção T apresentaram pesos cerca de 3 a 4 vezes maiores que as vigas mistas. A partir de 6 metros de comprimento, a diferença percentual entre os pesos das vigas mistas e as de concreto armado se manteve constante.

A diferença entre esses pesos pode ser explicada pela alta densidade do concreto e pela grande robustez das vigas de concreto armado, que necessitam de grandes seções para que

a rigidez equivalente a flexão seja suficientemente alta para resistir aos deslocamentos do ELS. De certa forma, a utilização de vigas de concreto armado de seção T pode acarretar no dimensionamento de pilares e fundações mais robustos para que o peso próprio dessas vigas seja resistido pela estrutura, enquanto isso, as vigas mistas proporcionam maior leveza na estrutura, pois a alma da viga é toda metálica e garante melhor resistência aos esforços de tração.

Como mostrado no item 4.2, nas considerações do estudo de caso foi adotado um carregamento linear fixo para todas as vigas, e este carregamento corresponde ao peso próprio da viga, as cargas permanentes e as cargas acidentais das lajes. Como as vigas de concreto armado de seção T são mais pesadas, elas suportarão menores esforços advindos das parcelas das lajes em comparação com as vigas mistas.

5.4 Análises adicionais

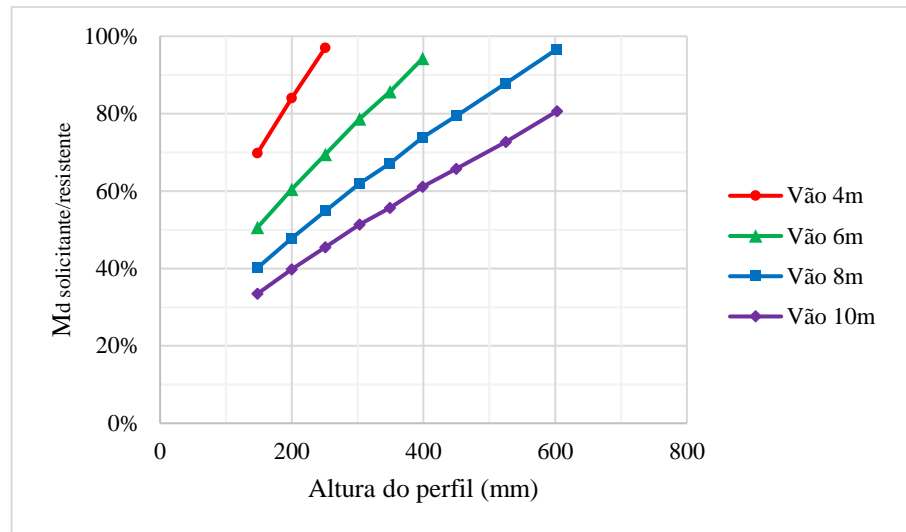
Algumas análises adicionais das vigas mistas foram feitas para verificar algumas propriedades visualizadas durante o processo de dimensionamento das vigas no item 5.1.

5.4.1 Relação entre o momento solicitante e resistente em vigas mistas

No dimensionamento de vigas mistas foi possível notar que elas eram limitadas quanto aos deslocamentos nos vãos e que essas vigas apresentaram uma capacidade resistiva superior aos momentos solicitantes de cálculo.

Para verificar o comportamento dessas vigas em uma limitação do ELS, aplicou-se o resultado do deslocamento igual ao seu limite nas planilhas de cálculo como feito anteriormente no item 4.2 e, a partir disso e também da variação do perfil metálico, descobriu-se os momentos solicitantes de cálculo que também satisfazem o ELU. A figura 5.7 mostra a relação entre o momento solicitante e resistente de cálculo da viga quando são variados o vão e a altura do perfil de aço.

Figura 5.7 – Análise de aproveitamento da seção quanto ao momento



Fonte: Autor

Nota-se na Figura 5.7 que quando o vão da viga é aumentado, a eficiência de um perfil de mesma altura diminui, pois ocorre uma subutilização da seção metálica, ou seja, o momento solicitante é reduzido para se adequar as condições da limitação do deslocamento máximo. No entanto, o momento resistente quase não se modifica, pois não houve alteração no perfil. Também é observado que o aumento do comprimento da viga mista reduz a eficácia do aumento da altura do perfil na obtenção de um melhor aproveitamento da seção, pois os coeficientes lineares das retas dos vãos diminuem.

É visto que o vão de 10 metros possui uma eficiência de 80% no aproveitamento do carregamento quando o perfil possui uma altura de aproximadamente 600 mm. Para o mesmo perfil no vão de 8 metros é possível obter o aproveitamento de 97% da relação entre o momento solicitante e o resistente.

Esta relação induz ao pensamento de que é necessário um perfil mais alto para vencer vãos maiores. Mas conforme o vão aumenta, não é possível utilizar uma seção de aço que consiga se aproximar a um aproveitamento total da resistência a flexão no ELU sem que a altura do perfil aumente consideravelmente para que a viga possa satisfazer o ELS.

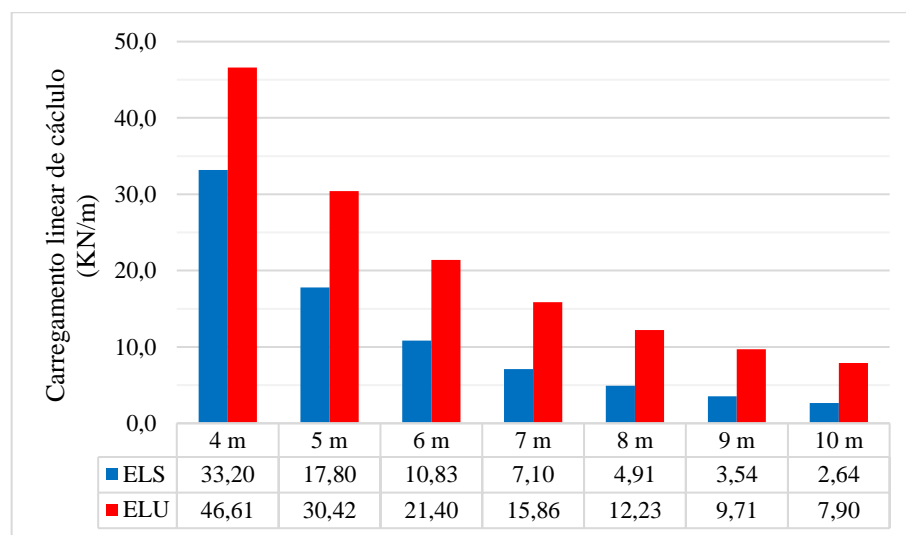
Em situações reais que possuem limitações quanto à altura da edificação seja ela residencial ou comercial, observa-se uma melhor utilização das vigas mistas de 4 metros, pois elas garantem uma boa eficiência na utilização do perfil de aço. Enquanto que em pontes, onde os vãos geralmente são superiores a 10 metros, a utilização de perfis mais altos acarreta maiores capacidades resistivas e um melhor aproveitamento da seção de aço.

5.4.2 Comportamento de vigas mistas no ELU e no ELS

Partindo da afirmação do item anterior que diz que não é possível obter um perfil de aço que atenda com proximidade ao estado limite último satisfazendo o estado limite de serviço em vãos elevados sem que a altura do perfil seja extrapolada.

Verifica-se, na Figura 5.8, a quantificação da perda do carregamento linear no dimensionamento nos dois estados limites quando ocorre o aumento do comprimento da viga e o perfil de aço utilizado não é modificado, de forma que a viga permaneça com a mesma resistência ao momento fletor.

Figura 5.8 – Carregamentos lineares suportados para o ELU e o ELS



Fonte: Autor

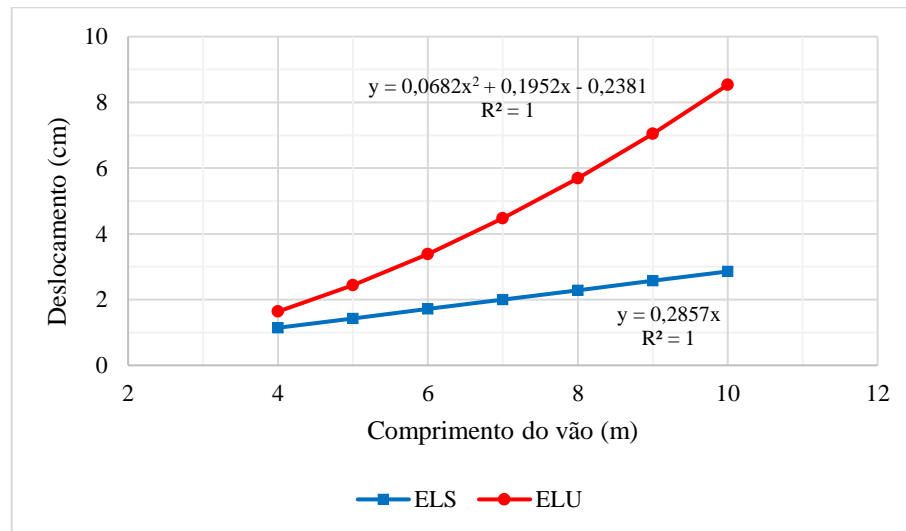
Na Figura 5.8 observa-se a redução do carregamento linear de cálculo (q_d) com o crescimento do vão e a diferença do carregamento que é adotado para satisfação de cada um dos estados limites. O dimensionamento pelo ELU sempre apresenta maiores valores de carregamento, porém a estrutura não pode considerá-los já que não satisfazem o ELS, visto que construtivamente os deslocamentos da viga serão superiores ao limite adotado pela norma e devem ocasionar problemas relacionados ao conforto dos usuários e a redução da durabilidade da estrutura.

Nas vigas mistas essa condição pode ser bem observada, pois o cálculo do momento resistente depende da laje de concreto, do perfil de aço e da otimização feita pelo projetista para aproximar o momento solicitante do resistente de cálculo. No entanto, a Figura 5.8 mostra que conforme o vão aumenta a diferença entre o ELU e o ELS cresce exponencialmente.

Ainda na análise da Figura 5.8, observa-se que para um comprimento de viga de 4 metros, tem-se que no ELU a carga suportada é de 46,61 kN/m, já no ELS é igual a 33,20 kN/m, sendo a razão entre os dois valores igual a 1,40, valor esse que é igual ao coeficiente de segurança de 1,4 adotado para cargas permanentes segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008). Por outro lado, quando se analisa o vão de 10 metros no ELU, a viga suporta apenas 7,90 kN/m, já no ELS o valor diminui para 2,64 kN/m, a razão entre os estados limites últimos e de serviço é igual a 2,99 nesta condição.

Quando é estabelecido um estudo da influência do vão quanto aos deslocamentos, verifica-se que o aumento do vão afasta os valores entre o ELS e o ELU conforme mostrado na Figura 5.9. Confirmando a diferença significativa entre os valores apresentados na Figura 5.8.

Figura 5.9 – Deslocamentos calculados para o ELU e o ELS



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 5.9 que os deslocamentos no ELS seguem o limite adotado ($L/350$) e, portanto, crescem linearmente, já os deslocamentos no ELU crescem exponencialmente com o aumento do vão.

Os resultados desta análise confirmam que as vigas mistas se encontram subutilizadas quando dimensionadas ao ELS e o desenvolvimento do comprimento do vão ajuda no aumento dessa subutilização, pois visualiza-se que todos os carregamentos encontrados são inferiores aos carregamentos no ELU.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou identificar os procedimentos de cálculo de vigas mistas e vigas de concreto armado de seção T na literatura quando dimensionadas tanto aos estados limites últimos quanto aos estados limites de serviço. A partir disso, foi possível elaborar rotinas de cálculo para confecção de planilhas que permitiram a facilidade na inserção dos dados de entrada e a obtenção dos resultados de forma simples e objetiva. Dessa forma, foi possível realizar a análise comparativa entre os tipos de vigas dimensionadas considerando um estudo de caso limitado a variação do vão dessas vigas quando submetidas a carregamentos lineares fixos.

No dimensionamento das vigas mistas observou-se que os deslocamentos máximos dos estados limites de serviço se tornaram o fator limitante para a escolha dos perfis metálicos. Além disso, conforme o desenvolvimento do vão, é verificado que a influência das flechas no dimensionamento tende a crescer, aumentando a distância entre a capacidade resistiva última e os esforços solicitantes ponderados da viga. Essa folga permite ainda mais segurança no dimensionamento das vigas mistas, possibilitando que a viga sofra grandes deformações antes de romper, por outro lado, no quesito economia, isso reflete na má eficiência da utilização do perfil metálico. De certa forma, essa diferença entre os estados limites pode ser reduzida adotando-se o uso de contraflechas nos perfis metálicos, viabilizando a redução no consumo de aço e permitindo que a viga deforme mais, tal consideração não foi feita pois as vigas já são escoradas e essa condição permite os mesmos benefícios das contraflechas.

Ainda no contexto das vigas mistas, foi verificada a existência de dois modelos que dizem respeito a escolha do perfil de aço da viga, um que favorece a redução da altura e o outro a redução do peso e do consumo de aço. A diferença entre o consumo de aço entre os modelos foi baixa, mas devido à escolha de perfis mais pesados, foi possível reduzir ainda mais a altura das vigas mistas, o que leva a conclusão de que nem sempre a economia pode ser vantajosa para as estruturas mistas, principalmente, quando se considera limitações de altura nos edifícios ou de elementos estruturais.

Tendo em vista o dimensionamento das vigas de concreto armado de seção T, foi possível verificar que os estados limites de serviço aumentam consideravelmente a altura das vigas analisadas e que devido a posição da linha neutra, grande parte da seção de concreto se encontra tracionada, o que leva ao aumento na ocorrência de patologias e na redução da durabilidade devido ao surgimento de fissurações na peça.

Quanto ao comparativo entre os dois tipos de vigas, foi possível observar que todas as vigas mistas apresentaram alturas inferiores as vigas de concreto armado. E que o aumento do vão acarreta o crescimento na eficiência da altura das vigas mistas, sendo possível reduzir ainda mais a altura quando se avalia vãos elevados. Enquanto isso, o consumo de aço foi no mínimo, dobrado, devido a utilização das vigas mistas e, quando considerado maiores vãos, o consumo de aço triplicou.

O consumo de concreto calculado seguindo as considerações da metodologia se mostrou insignificante para as vigas mistas, enquanto que as vigas de concreto armado de seção T apresentaram grandes almas de concreto responsáveis pela grande robustez dessas vigas. Tal afirmação pôde ser comprovada na verificação do peso próprio da alma dessas vigas, onde as vigas de concreto armado apresentaram pesos cerca de 3 a 4 vezes superiores aos das vigas mistas.

Observa-se que na escolha do sistema construtivo ideal deve ser levado em conta vários fatores, embora que a vantagem na altura das vigas mistas seja imensa, o consumo de aço devido aos perfis laminados deve acarretar em grandes custos comparado as vigas de concreto armado, porém o menor peso das vigas mistas acarreta na diminuição das seções dos outros elementos estruturais como os pilares e as fundações.

Por fim, a pesquisa pode ser aprofundada em trabalhos futuros através da variação de parâmetros que neste trabalho se mantiveram fixos como a resistência do concreto, a espessura da laje e, principalmente, o escoramento. Sugere-se também a avaliação dos custos de produção das vigas mistas e das vigas de concreto armado de seção T, já que foi abordado somente o quantitativo de materiais.

REFERÊNCIAS

- ALVA, G. M. S.; MALITE, M. **Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 7, n. 25, p. 51-84, 2005.
- ALVA, G. M. S. **Concepção estrutural de edifícios em concreto armado**. Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 24 p., 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 237 p., 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 238 p., 2014.
- BASTOS, P. S. S. **Flexão normal simples - Vigas**. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 79 p., 2019.
- BRANSON, D.E. **Deflections of reinforced concrete flexural members**. Journal of the American Concrete Institute, n.6331, p. 637-667, 1966
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: Segundo a NBR 6118:2014**. v. 1, 4. ed. São Carlos: Edufscar, 415 p., 2014.
- CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: Volume 2**. São Paulo: Pini, 585 p., 2009.
- FERNANDES, S. A. **Análise das deformações do concreto e do comportamento de vigas submetidas a flexão simples**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 142 p., São Carlos, 1996.
- HIGAKI, B. E. **Análise teórica e experimental de vigas mistas de aço e concreto e laje com vigotas pré-moldadas e lajotas cerâmicas em um pavimento tipo**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 196p., São Carlos, 2009.
- MACHADO, R. T. **Análise da viabilidade econômica do projeto estrutural de edifícios de múltiplos andares com estrutura de aço**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 267 p., São Carlos, 2012.
- NORONHA, M. V.; CAVALCANTE, M. A. A. **Procedimento para avaliação de deslocamentos de vigas de concreto armado**. XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE, Rio de Janeiro, 2015.
- PIASSI, A. D.; DIAS, J. V.; CALENZANI, A. F. G.; MENANDRO, F. C. C. **Lateral distortional buckling of cellular composite-beams**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 11, n. 2, p. 331-356, 2018.
- PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Cisalhamento em vigas**. DEE – Universidade de São Paulo, 13 p., 2003.

PFEIL., W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009 (reimpr. 2014).

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R.J.; MARTINS, A. G. **Estruturas Mistas**. Instituto Aço Brasil/CBCA, Rio de Janeiro, v.1 e 2, 2. ed., 2012.

SILVA, R. J. C. **Concreto Armado**. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Estadual do Vale do Acaraú, Sobral, 3. ed., 2017.