

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Márcio Brecher Müller

**VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO: COMPARAÇÃO COM
VIGAS SIMPLES EM UM ESTUDO DE CASO**

Porto Alegre

Junho 2015

MÁRCIO BRECHER MÜLLER

**VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO: COMPARAÇÃO COM
VIGAS SIMPLES EM UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Felipe Schaedler de Almeida

Porto Alegre

Junho 2015

MÁRCIO BRECHER MÜLLER

**VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO: COMPARAÇÃO COM
VIGAS SIMPLES EM UM ESTUDO DE CASO**

de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 junho de 2015

Prof. Felipe Schaedler de Almeida
Dr. pelo PPGEC/UFRGS
Orientador

Prof. Jean Marie Desir
Dr. pela UFRJ
Coordenador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes (UFRGS)
Dr. techn. pela Universität Innsbruck, Áustria

Prof. Inácio Benvegnu Morsch (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Jorge Luis Palomino Tamayo
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Gilberto e Nerci, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Felipe Schaedler de Almeida, orientador deste trabalho, pela dedicação e profissionalismo, pois não mediu esforços para que este trabalho fosse realizado.

Agradeço ao ex-colega de graduação e hoje engenheiro Fabrício Deives Kummer por todo apoio acadêmico durante o período deste curso e acima de tudo pela amizade sincera e verdadeira que me concedeu.

Sem esquecer de uma pessoa que me passou grandes conhecimentos e também me influenciou na decisão de qual área seguir, o engenheiro e colega de trabalho Rodrigo Costa da Silveira. Profissional que tem o prazer de repassar tudo aquilo que aprendeu e aprende, sempre com a mesma tranquilidade. Meus sinceros agradecimentos.

A todos os amigos e familiares que me apoiaram e incentivaram durante toda esta jornada, muito obrigado.

Só se pode alcançar um grande êxito
quando nos mantemos fieis a nós mesmos.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

Este trabalho versa sobre a comparação de vigas mistas aço-concreto com vigas simples utilizando como sistemas construtivos laje com fôrma de aço incorporada (*steel deck*) e laje maciça de concreto. Inicialmente é feita uma revisão bibliográfica que aborda os principais tópicos relacionados ao assunto de vigas mistas aço-concreto como tipo de uso, critérios de projeto, tipos de seções e dimensionamento de acordo com NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008). A partir daí foi desenvolvida uma rotina de cálculo utilizando o *Microsoft Office Excel* que calcula o momento resistente da seção mista e esforço cortante resistente para nervuras perpendiculares e paralelas à seção de aço, no caso de *steel deck*, ou seja, condição de estado limite último. Nesta mesma planilha foram incluídas também as verificações necessárias para o estado limite de serviço, referente a deslocamentos excessivos. Estas verificações foram baseadas num modelo de viga biapoiada. Após foi escolhido um pavimento tipo de um edifício residencial para realizar os cálculos e analisar o comportamento de duas vigas submetidas a carregamentos diferentes. Para ter um maior volume de resultados, foram criadas ainda duas situações fictícias. Na primeira (caso 1) o dimensionamento foi realizado com a intenção de reduzir o consumo de aço. Na segunda (caso 2) o dimensionamento foi limitado em uma altura máxima de 40cm (viga + laje). Este caso representa uma eventual restrição geométrica imposta pelo projeto arquitetônico. Com isso foi possível realizar as comparações entre cada método construtivo e a apresentação dos diferentes resultados. Constatou-se que a solução de viga mista com *steel deck* apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito ao consumo de aço, de acordo com as comparações feitas. Este mesmo método construtivo foi o que mostrou a menor relação de momentos (M_{sd}/M_{rs}), indicando maior resistência da seção. A condição de restrição geométrica da estrutura em 40,0cm (caso 2) foi atendida com sucesso, porém teve um aumento no consumo de aço de 55% na V9 e 37% na V10.

Palavras-chave: Verificações de vigas mistas. Comparação de vigas mistas com vigas simples
Vigas mistas com nervura paralela à seção de aço.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Viga mista sob interação completa	18
Figura 2 – Diagrama das etapas de pesquisa	22
Figura 3 – Interação aço e concreto em vigas mistas	25
Figura 4 – Tensões normais na laje comprimida e largura efetiva da laje.....	29
Figura 5 – Seção homogeneizada.....	30
Figura 6 – Elevação da viga, seção transversal, diagrama de deformações com ligação total e diagrama de tensões em regime plástico.....	34
Figura 7 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na camada de concreto.....	36
Figura 8 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na seção de aço.....	38
Figura 9 – Seção transversal de viga mista com fôrmas de aço com nervuras paralelas a seção de aço.....	42
Figura 10 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na camada de concreto.....	44
Figura 11 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na nervura de concreto.....	45
Figura 12 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na mesa superior.....	48
Figura 13 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na alma do perfil.....	50
Figura 14 – Tipos usuais de conectores.....	52
Figura 15 – Curva FORÇA x ESCORREGAMENTO para conectores.....	52
Figura 16 – Aplicação - soldagem por eletrofundição	53
Figura 17 – Ilustração do valor a ser tomado para e_{mh}	55
Figura 18 – Lajes de concreto com forma de aço incorporada.....	57
Figura 19 – Lajes de maciça de concreto com estruturas metálicas	58
Figura 20 – Viga mista com laje maciça de concreto.....	59
Figura 21 – Planta baixa do pavimento tipo.....	64
Figura 22 – Carregamento típico.....	69
Figura 23 – Seção transversal MF-75.....	69
Figura 24 – Seção transversal de viga simples.....	73
Figura 25 – Seção transversal típica de vigas mistas com laje maciça.....	75
Figura 26 – Seção transversal de viga simples com laje maciça.....	77
Figura 27 – Viga V9 com <i>steel deck</i>	81

Figura 28 – Interação completa com <i>steel deck</i>	81
Figura 29 – Vigas com interação nula.....	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades elásticas.....	60
Quadro 2 – Valores característicos de ações atuantes.....	65
Quadro 3 – Combinações de ações no ELU e ELS para VM-SD.....	66
Quadro 4 – Combinações de ações no ELU e ELS para VS-SD.....	66
Quadro 5 – Combinações de ações no ELU e ELS para VM-LM.....	66
Quadro 6 – Combinações de ações no ELU e ELS para VS-LM.....	66
Quadro 7 – Cargas atuantes na V9.....	68
Quadro 8 – Cargas atuantes na V10.....	68
Quadro 9 – Verificações na etapa construtiva para o caso 1.....	71
Quadro 10 – Verificações na etapa construtiva para o caso 2.....	71
Quadro 11 – Verificações na etapa final para o caso 1.....	72
Quadro 12 – Verificações na etapa final para o caso 2.....	72
Quadro 13 – Definição dos perfis VS-SD.....	73
Quadro 14 – Verificações para o caso 1.....	74
Quadro 15 – Verificações para o caso 2.....	74
Quadro 16 – Definição dos perfis VM-LM.....	76
Quadro 17 – Verificações para o caso 1 e 2.....	76
Quadro 18 – Definição dos perfis VS-LM.....	77
Quadro 19 – Verificações para o caso 1.....	78
Quadro 20 – Verificações para o caso 2.....	79
Quadro 21 – Resultados V9 caso 1.....	79
Quadro 22 – Resultados V10 caso 1.....	79
Quadro 23 – Resultados V9 caso 2.....	80
Quadro 24 – Resultados V10 caso 2.....	80
Quadro 25 – Valores característicos das ações atuantes.....	83
Quadro 26 – Cargas atuantes.....	84
Quadro 27 – Verificação na etapa construtiva.....	84
Quadro 28 – Verificação na etapa final.....	85
Quadro 29 – Análise dos deslocamentos.....	85
Quadro 30 – Verificação na etapa construtiva.....	85
Quadro 31 – Verificação na etapa final.....	85
Quadro 32 – Análise dos deslocamentos.....	86

LISTA DE SIGLAS

ELU – Estado Limite Último

ELS – Estado Limite de Serviço

LNP – Linha Neutra Plástica

VM-SD – Viga mista com *steel deck*

VS-SD – Viga simples com *steel deck*

VM-LM – Viga mista com laje maciça

VS-LM – Viga simples com laje maciça

LISTA DE SÍMBOLOS

h – altura da alma do perfil laminado (mm)

t_w – espessura da alma (mm)

f_y – tensão de escoamento do aço (MPa)

E_s – módulo de elasticidade do aço (MPa)

E_c – módulo de elasticidade do concreto (MPa)

AR 350 – aço de alta resistência com tensão de escoamento igual a 345MPa

f_{ck} – resistência à compressão característica do concreto (MPa)

b_e – largura efetiva da laje (cm)

a – metade da distância entre duas vigas (cm)

e – comprimento do balanço de uma viga (cm)

α – razão modular

α_∞ – razão modular total

E_{c0} – módulo de elasticidade inicial do concreto (MPa)

E_{cs} – módulo de elasticidade secante do concreto (MPa)

$E_{c\infty}$ – módulo de elasticidade do concreto total (MPa)

φ – coeficiente de fluência do concreto

$\varepsilon_{c\infty}$ – deformação total (cm)

ε_{c0} – deformação elástica (cm)

ε_{cc} – deformação plástica (cm)

x – profundidade da seção comprimida do concreto (cm)

h_c – espessura da camada de concreto acima da fôrma de aço incorporada (cm)

h_p – altura da nervura da fôrma de aço incorporada (cm)

h_f – altura da nervura da fôrma de aço incorporada, nomenclatura da NBR 8800 (cm)

F_{cd} – força resultante da tensão de compressão (kN)

F_{td} – força resultante da tensão de tração (kN)

R_{cd} – resistência à compressão do concreto de cálculo (kN/cm²)

R_{td} – resistência à tração do aço de cálculo (kN/cm²)

z – braço de alavanca de F_{cd} e F_{td} (cm)

z' – braço de alavanca de C_{ad} (cm)

$M_{d\ res}$ – momento fletor resistente da seção de cálculo (kNm)

γ_c – coeficiente de minoração da resistência do concreto

γ_{al} – coeficiente de minoração da resistência do aço estrutural

A – área da seção de aço tracionada (cm²)

y_s – distância do centro de gravidade à borda superior da seção de aço (cm)

C_{ad} – força resistente de cálculo da região comprimida da seção de aço (kN/cm²)

y_t – distância do centro de gravidade da seção de aço tracionada à borda inferior (cm)

y_c – distância do centro de gravidade da seção de aço comprimida à borda superior (cm)

y – posição da linha neutra plastificada à borda superior do perfil de aço (cm)

b_f – largura da mesa do perfil de aço (mm)

t_f – espessura da mesa do perfil de aço (mm)

η – grau de conexão de uma ligação

F_{hd} – esforço de cisalhamento de cálculo (kN)

Q_{Rd} – resistência dos conectores de cálculo (kN)

f_{cd} – resistência de cálculo à compressão do concreto (kN/cm²)

f_{yd} – resistência de cálculo do escoamento do aço (kN/cm²)

L_e – comprimento do trecho de momento positivo (cm)

F – força transmitida pelo conector (kN)

s – escorregamento relativo na interface

γ_{cs} – coeficiente parcial de segurança do conector

f_{ucs} – resistência de ruptura do conector (MPa)

R_g – efeito dos conectores na nervura

R_p – considera posição dos conectores na nervura

n – número de conectores

Q_n – resistência nominal do conector (kN)

$M_{P,Sd}$ – momento fletor resistente de cálculo na seção de carga concentrada (kNm)

$M_{a,Sd}$ – momento fletor resistente de cálculo na viga de aço isolada (kNm)

M_{Sd} – momento fletor solicitante de cálculo (kNm)

I_{ef} – momento de inércia reduzido da seção (cm⁴)

I_a – momento de inércia da seção de aço (cm⁴)

I_r – momento de inércia da seção mista (cm⁴)

L – vão teórico entre apoios (m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	20
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	20
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	20
2.2.1 Objetivo principal	20
2.2.2 Objetivos secundários	20
2.3 PRESSUPOSTO	21
2.4 DELIMITAÇÃO	21
2.5 LIMITAÇÃO	21
2.6 DELINEAMENTO	21
3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	24
3.1 HÍSTÓRICO	24
3.2 GENERALIDADES DA SEÇÃO MISTA	24
3.2.1 Tipos de ligação	24
3.2.2 Tipos de seção	26
3.2.3 Quanto ao escoramento	27
4 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO DE VIGAS MISTAS	28
4.1 LARGURA EFETIVA DA LAJE	28
4.2 SEÇÃO HOMOGENEIZADA.....	29
4.2.1 Efeitos de curta duração	30
4.2.2 Efeitos de longa duração	31
5 ESTADO LIMITE ÚLTIMO – ELU	33
5.1 SEÇÃO DE AÇO COMPACTA COM LIGAÇÃO TOTAL.....	33
5.1.1 Fôrmas com nervuras perpendiculares à seção de aço	34
5.1.1.1 Linha neutra plástica na laje de concreto.....	36
5.1.1.2 Linha neutra plástica na seção de aço.....	38
5.1.2 Fôrmas com nervuras paralelas à seção de aço	41
5.1.2.1 Linha neutra plástica na laje de concreto.....	43
5.1.2.1.1 LNP acima do topo da nervura.....	43
5.1.2.1.2 LNP entre o topo da nervura e o topo da seção de aço.....	45
5.1.2.2 Linha neutra plástica na seção de aço	47
5.1.2.2.1 LNP na mesa da seção de aço.....	47
5.1.2.2.2 LNP na alma da seção de aço.....	49

5.2 CONECTORES DE CISALHAMENO	51
5.2.1 Processo de soldagem	53
5.2.2 Dimensionamento dos conectores	53
5.2.2.1 Número de conectores em seção de aço compacta	55
5.2.3 Limitações adicionais	56
5.3 LAJES MISTAS – STEEL DECK	57
5.4 LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO	58
6 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO – ELS	60
6.1 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	60
6.2 DESLOCAMENTOS MÁXIMOS	61
7 APLICAÇÕES E RESULTADOS.....	63
7.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	63
7.2 AÇÕES CONSIDERADAS.....	64
7.2.1 Combinação das ações.....	65
7.3 DIMENSIONAMENTOS DAS VIGAS.....	67
7.3.1 Cargas	67
7.3.2 Solicitações.....	68
7.3.3 Vigas mistas com <i>steel deck</i>.....	69
7.3.3.1 Cargas do sistema construtivo.....	70
7.3.3.2 Verificações.....	70
7.3.3.2.1 <i>Etapa construtiva</i>	70
7.3.3.2.2 <i>Etapa final</i>	71
7.3.4 Vigas simples com <i>steel deck</i>.....	70
7.3.4.1 Cargas do sistema construtivo.....	73
7.3.4.2 Verificações.....	73
7.3.5 Vigas mistas com laje maciça de concreto.....	75
7.3.5.1 Cargas do sistema construtivo.....	75
7.3.5.2 Verificações.....	76
7.3.6 Vigas simples com laje maciça de concreto.....	77
7.3.6.1 Cargas do sistema construtivo.....	77
7.3.6.2 Verificações.....	78
7.4 COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS.....	79
7.5 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS COM NERVURAS PARALELAS À SEÇÃO DE AÇO.....	83
7.5.1 Determinação das cargas.....	83

7.5.2 Resultados para o vão de 5m.....	84
7.5.3 Resultados para o vão de 8m.....	85
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE A	90

1 INTRODUÇÃO

O presente cenário da construção civil mostra sinais da necessidade de projetos otimizados no que diz respeito à velocidade de execução e maior controle no dimensionamento das estruturas. A utilização de estruturas mistas de aço-concreto nas edificações é um dos mecanismos para atender a essa tendência do mercado, pois essas possuem maior facilidade de montagem dos elementos estruturais assim como melhor aproveitamento da resistência de cada material, em relação às estruturas não mistas.

Para Alva e Malite (2005, p. 1), “Os elementos mistos de aço-concreto são constituídos pela combinação de perfis de aço e concreto, visando aproveitar as vantagens de cada material, tanto em termos estruturais como construtivos.”.

Pfeil e Pfeil (2009, p. 265), fazem uma afirmação no âmbito de vigas mistas de aço-concreto que “Uma viga pode ser considerada mista quando um perfil metálico está trabalhando em conjunto com uma laje de concreto. Para garantir a interação entre esses materiais são necessários elementos que transmitam esforços de um ao outro. São usados para essa função os conectores de cisalhamento.”. As vigas mistas não se limitam apenas ao uso do aço com o concreto, podendo ser encontradas pela combinação de outros materiais como, por exemplo, o aço e a madeira. Entretanto, não será o foco deste trabalho.

Conforme Silva e Pannoni (2010, p. 222-223):

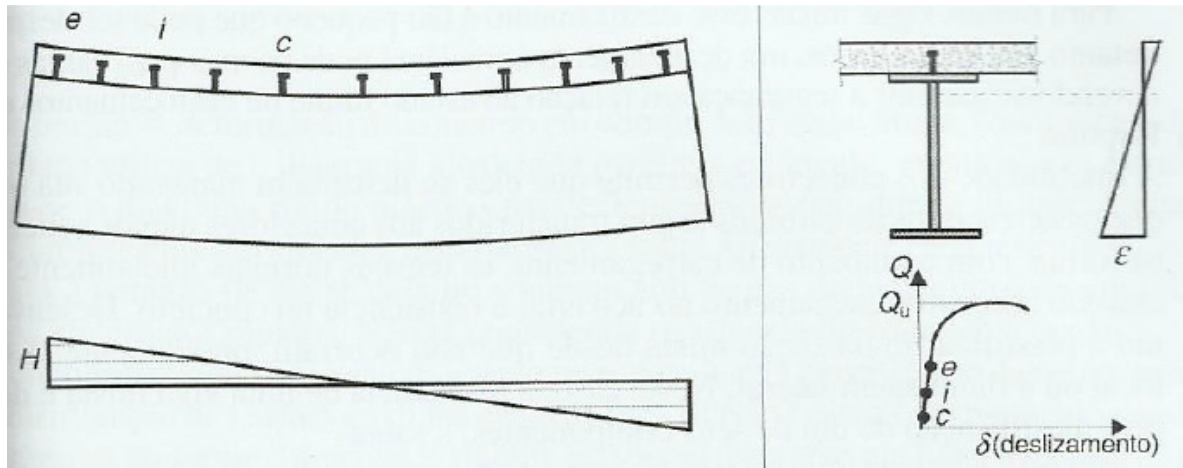
A flexão de uma viga isostática causa compressão na mesa superior do perfil. A laje de concreto pode ser colaborante, ou seja, contribuir na capacidade resistente à compressão, reduzindo, assim, as dimensões do perfil. Além disso, há redução da flecha.

Para que a laje seja colaborante, deve garantir-se que os esforços da viga passem para a laje. O que se consegue usando conectores de cisalhamento soldados na mesa superior da viga e embutidos na laje [...].

A figura 1 apresenta uma viga mista com ligação total. Os conectores assumem o papel de ligar os dois materiais aço e concreto, de maneira que não ocorra deslizamento na interface dos mesmos. É possível observar no diagrama de deformações normais ε da seção, que a flexão se dá em torno do centroide da seção mista, no regime elástico, ocorrendo assim uma

melhor distribuição dos esforços de tração e compressão. Os conectores de cisalhamento são mais solicitados nas extremidades, conforme mostra o diagrama de esforço horizontal H . Este esforço é proporcional ao diagrama de esforço cortante da viga.

Figura 1 – Viga mista sob interação completa



(fonte: PFEIL; PFEIL, 2009, p. 267)

A crescente utilização das vigas mistas em obras de médio e grande porte (por exemplo, edifícios comerciais e industriais), tanto no contexto mundial como no Brasil, tem início com a evolução dos processos de soldagem do conector de cisalhamento à viga de aço, tornando mais viável a execução desta estrutura. (BELLEI et al., 2004, p. 293).

O uso desse sistema estrutural quando comparado a vigas metálicas, apresenta maior rigidez da seção transversal devido à combinação do aço com concreto, tornando possível vencer maiores vãos e maiores cargas. Quando comparado a uma viga de concreto, apresenta significativa rapidez de execução. (ALVA; MALITE, 2005, p. 2).

Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento de uma viga composta por um perfil metálico e uma camada de concreto sobre a mesa superior do perfil, formando uma estrutura mista. Será abordada a ligação total entre estes elementos, para que formem uma única peça. Com isso será possível precisar a redução das dimensões da estrutura, ou seja, o quanto mais econômico é utilizar vigas mistas em comparação com as vigas simples. A economia mencionada será função da geometria do perfil metálico, uma vez que a camada de concreto é dimensionada pela resistência da laje. Será feita uma comparação entre o sistema misto e o sistema simples e ainda entre laje com fôrma de aço incorporada e laje maciça de concreto. O

sistema misto é caracterizado pela existência de interação entre viga de aço e a laje, já o sistema simples apresenta interação nula entre viga de aço e a laje.

Será elaborada uma rotina baseada nos métodos de cálculo da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008). Os resultados são fruto do dimensionamento estrutural de um pavimento tipo de uma edificação que será formado ora por aço e concreto trabalhando em conjunto e ora trabalhando separados.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a redução das dimensões do perfil metálico quando os dois materiais, aço e concreto, estiverem trabalhando em conjunto em relação à situação na qual não se caracteriza uma viga mista?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a apresentação de um estudo comparativo entre as resistências e deformações de vigas mistas com aquelas vigas formadas por um perfil metálico quando submetidas as mesmas condições de projeto, verificando as diferenças nas dimensões dos perfis.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) apresentação das diretrizes para o cálculo de vigas mistas;
- b) comparação quantitativa entre as seções mistas e simples, para cada tipo de perfil utilizado, como por exemplo, perfil x consumo de aço.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as recomendações da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), relativas às vigas mistas de aço e concreto, são válidas, que as informações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes são exatas e que a interação do aço e do concreto na mesa superior do perfil metálico, aumenta a resistência.

2.4 DELIMITAÇÃO

O trabalho delimita-se ao estudo de vigas mistas de aço e concreto com interação completa, biapoiadas, supondo laje de concreto com fôrma de aço incorporada e laje maciça. O tipo de conector a ser utilizado será o pino com cabeça.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) o estudo será feito com seções laminadas do tipo W e com aço do tipo AR350;
- b) terá como variáveis a geometria do perfil e cargas atuantes;
- c) comparação será feita com apenas alguns poucos casos de variáveis;
- d) a comparação não considera aspectos econômicos e construtivos;
- e) dimensionamento não otimizado das vigas, embora sejam realizadas várias tentativas na busca da solução mais econômica.

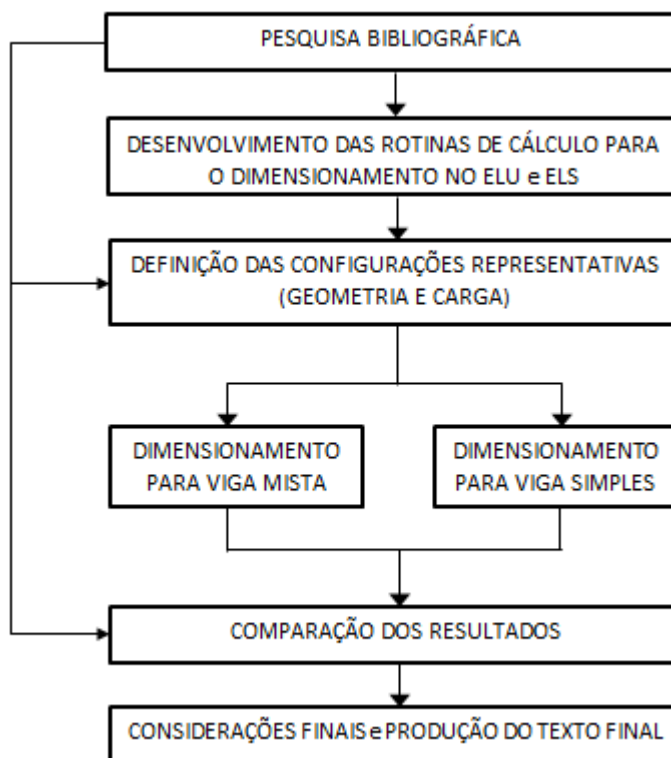
2.6 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 2 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) desenvolvimento das rotinas de cálculo para o dimensionamento no ELU e ELS;
- c) definição das configurações estudadas (geometria e carga);
- d) resultados para vigas mistas e o vigas simples;
- e) comparação dos resultados;

f) considerações finais.

Figura 2 – Diagrama das etapas de pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica**, com ênfase nos períodos iniciais, será realizada em todos os períodos com a finalidade de se aprofundar no assunto e servirá de base teórica para as etapas seguintes. Através de bibliografias técnicas e normas serão elaborados métodos para o desenvolvimento do trabalho.

Para o **desenvolvimento da rotina de cálculo**, serão utilizados os conceitos necessários para efetuar o **dimensionamento no ELU e ELS** vistos na etapa anterior e transferidos, na forma de linguagem computacional, para planilha de cálculo.

Com a **definição das configurações representativas** a serem utilizadas, função da geometria da estrutura, da distância entre os apoios e do carregamento atuante, será possível realizar o cálculo dos esforços a que estarão submetidas às vigas em estudo e conseqüentemente dimensionar vigas mistas e vigas simples.

Na etapa seguinte, é apresentada uma **comparação dos resultados** obtidos de uma estrutura composta por um perfil metálico trabalhando em conjunto com uma laje com fôrma de aço incorporada e uma laje maciça de concreto com aquela estrutura de uma viga metálica trabalhando. Esta comparação terá o foco na redução das dimensões da estrutura para os diferentes casos analisados. Por fim, com as **considerações finais** e a produção do texto final, será possível fazer o fechamento do trabalho.

3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

3.1 HISTÓRICO

Segundo Pfeil e Pfeil (2009, p. 264), “As vigas mistas passaram a ter grande utilização após a II Guerra Mundial. Anteriormente, empregavam-se vigas metálicas com lajes de concreto, sem considerar no cálculo a participação da laje no trabalho da viga. [...]”.

Bellei et al., 2004, p. 293, explicam que, “Este fato era justificável devido às dificuldades em se garantir a transmissão do fluxo de cisalhamento entre a laje e a viga de aço, desenvolvido durante a flexão.”.

Em âmbito nacional, a utilização de vigas mistas foi bastante tardia, conforme Andrade (2000), “Penso que a razão, antes de tudo, é cultural. Veja, ninguém pode se acostumar a usar um material que não existe no próprio país. Passamos quase toda a primeira metade do século XX sem a principal matéria-prima da construção metálica, que é o aço estrutural. [...]”.

3.2 GENERALIDADES DA SEÇÃO MISTA

3.2.1 Tipos de ligação

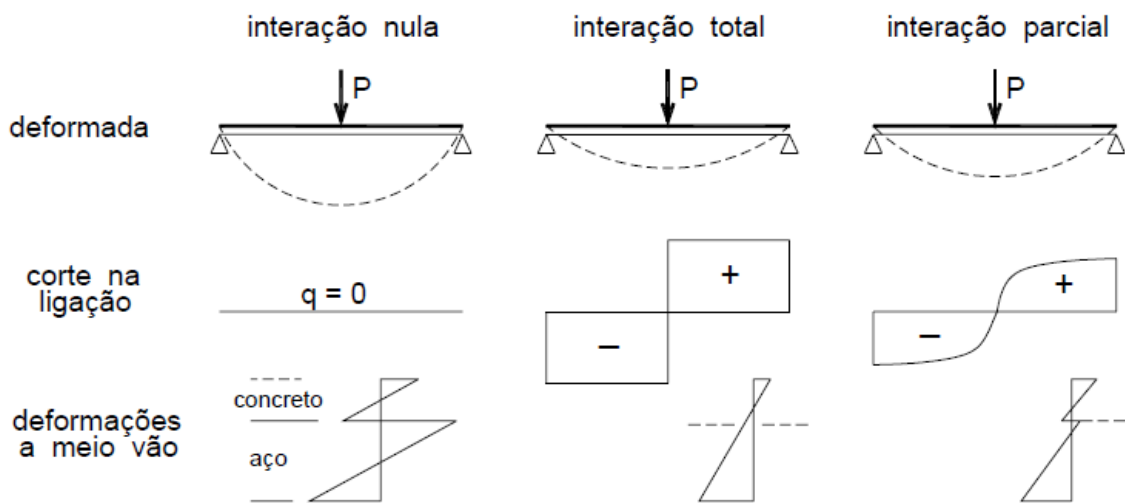
Pfeil e Pfeil (2009, p. 268) afirmam que as vigas mistas podem ter ligação total e ligação parcial, conforme segue abaixo:

Viga mista com ligação total a cisalhamento é aquela cujo momento fletor resistente não é determinado pelo corte dos conectores, isto é, o aumento no número de conectores não produz acréscimo de resistência a flexão (Eurocódigo 4)¹. Em caso contrário tem-se uma viga mista com ligação parcial a cisalhamento, que possui menos conectores que sua correspondente com ligação total. Em geral, a opção por um projeto com ligação parcial decorre do fator econômico. Nos dois casos, a determinação da resistência a flexão é feita no regime plástico para seções de aço compactas.

¹ Eurocódigo 4 – Calcul des structures mixtes acier-béton, Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments, Comité Européen de Normalisation (CEN). Bruxelles, 2005.

Uma comparação entre as três possibilidades de interação em uma estrutura mista é mostrada na figura 3. Na interação nula não é caracterizada uma viga mista, pois não existe ligação entre os dois elementos. Destaca-se a menor rigidez de seção transversal encontrada numa viga com interação nula (teórico) em relação aos outros casos, permitindo deformações indesejáveis e também um arranjo de distribuição de esforços, de tração e compressão, desfavoráveis, quando comparada com os outros casos.

Figura 3 – Interação aço e concreto em vigas mistas



(fonte: ALVA; MALITE, 2005, p. 56)

Alva e Malite (2005, p. 55) afirmam que, “Na interação completa, considera-se que existe uma ‘ligação perfeita’ entre o aço e concreto. Neste caso, não há escorregamento longitudinal relativo, verificando-se a existência de uma única linha neutra, [...]”.

Alva e Malite (2005, p. 56) reforçam que:

Quando ocorre escorregamento relativo ao nível da ligação aço-concreto, há uma descontinuidade no diagrama de deformações, caracterizando a interação parcial. Em consequência disso, a seção transversal da viga apresenta duas linhas neutras. O efeito do escorregamento afeta a distribuição de tensões na seção, a distribuição do fluxo de cisalhamento longitudinal na conexão e, conseqüentemente, a deformabilidade das vigas. Esta última é relevante em verificações no regime de utilização da estrutura.

A ligação entre o aço e o concreto é dimensionada em função do diagrama de esforços cortantes longitudinais por unidade de comprimento q , conhecido como *fluxo de cisalhamento longitudinal*.

3.2.2 Tipos de seção

As seções de vigas mistas podem ser classificadas quanto ao efeito de flambagem local, pela esbeltez da alma. De acordo com NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 168) as vigas mistas de aço e concreto de alma cheia biapoiadas devem ter relação entre a altura e a espessura da alma (h/t_w) inferior ou igual a $5,7\sqrt{E/f_y}$, valor limite para viga de alma esbelta, ou seja, FLA (flambagem local da alma) em regime elástico. Se h/t_w for igual ou inferior a $3,76\sqrt{E/f_y}$, situação em que não ocorre FLA, essas vigas são compactas e podem ser dimensionadas usando as propriedades plásticas da seção mista [...]. Se h/t_w superar $3,76\sqrt{E/f_y}$, situação em que o perfil é suscetível à FLA em regime inelástico, as vigas devem ser dimensionadas usando as propriedades elásticas da seção mista.

Sendo:

h = distância entre as faces internas das mesas nos perfis soldados (nos perfis laminados deve-se retirar os dois raios de concordância entre a mesa e a alma);

t_w = espessura da alma;

E = módulo de elasticidade do aço.

f_y = tensão de escoamento do aço.

Para o estudo desse trabalho, considera-se um aço AR 350 ($f_y = 345\text{MPa}$), neste caso o limite de esbeltez de uma seção compacta é fixado em 92. Como os perfis laminados tipo W possuem uma relação entre a altura e a espessura da alma inferior a 92, o estudo fica limitado às seções compactas.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009, p. 273-274), “Nos casos de seções compactas em que não ocorrerá flambagem local antes da plastificação total de seção utilizam-se então diagrama de tensões com plastificação total para o cálculo do momento fletor resistente da seção mista [...]”.

Entretanto, Pfeil e Pfeil (2009, p. 274), define que, “Para as seções semicompactas nas quais [...] a flambagem local da alma ocorre antes da plastificação total da seção, o momento resistente da viga mista é obtido com o diagrama de tensões em regime elástico na situação de início de plastificação da seção.”.

3.2.3 Quanto ao escoramento

No que diz respeito ao escoramento são apresentadas duas possibilidades, conforme Bellei et al. (2004, p. 294):

Construtivamente, as vigas mistas podem ser executadas de duas formas diferentes, a saber:

- a) em uma construção escorada, a viga de aço é escorada durante a construção, e o escoramento deve ser adequado para que a viga de aço permaneça praticamente sem solicitação até a retirada desse escoramento, o que será feito após a cura do concreto.
- b) em uma construção não escorada, na primeira fase, quando o concreto ainda não curou (antes de atingir $0,75 f_{ck}$) a viga de aço deve suportar todas as solicitações nesta fase [...].

A utilização de laje *steel deck* dispensa a utilização do escoramento das lajes, respeitando as indicações do fabricante, pois é um sistema que suporta as cargas existentes na etapa de construção da obra devido a rigidez que as nervuras geram na fôrma metálica. Com isso, a viga metálica que recebe as reações da laje, deverá ser responsável por garantir estabilidade da estrutura até que o concreto atinja $75\% f_{ck}$.

Já no sistema convencional, lajes maciças de concreto, as mesmas necessitam escoras abaixo das fôrmas de madeira que resistem o concreto fresco. Automaticamente as vigas metálicas ou não recebem escoramento. Esta tecnologia bastante tradicional apresenta algumas desvantagens dentro do canteiro de obra como, por exemplo, criando obstáculos para passagem de funcionários e equipamento e também a necessidade de mais funcionários para a montagem e desmontagem das escoras.

4 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO DE VIGAS MISTAS

Para realizar o dimensionamento de uma viga mista, é recomendado que se tenha como referência uma norma ou algum outro material técnico que possua as diretrizes de cálculo. Neste capítulo, será apresentado os critérios de projeto presentes na NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) necessários para o dimensionamento no estado limite último (ELU) e estado limite de serviço (ELS).

4.1 LARGURA EFETIVA DA LAJE

Segundo Alva e Malite (2005, p. 57) pode-se afirmar que:

O conceito de largura efetiva permite levar em consideração o efeito *shear lag* relacionado com a distribuição de tensões axiais na largura da laje. A teoria elementar da flexão em vigas supõe que as tensões axiais não variam ao longo da mesa de uma viga. Entretanto, sabe-se que, quando a largura é muito grande, a partir de uma certa distância do eixo da alma da viga, trechos da mesa não trabalham inteiramente ao momento fletor, [...]. Portanto, a viga é menos rígida que o indicado pela teoria elementar da flexão. No entanto, é usual substituir a largura real das mesas por uma largura reduzida, de modo que a referida teoria elementar da flexão, aplicada nesta viga de seção transversal transformada, forneça o valor correto da máxima tensão de flexão. Esta largura reduzida da mesa é denominada *largura efetiva*. [...]

Pinto (2009, p. 75) afirma que: “O aumento da espessura da laje permite que a diferença entre a tensão máxima longitudinal que ocorre no eixo de simetria da viga, e a tensão na fibra de cada uma das extremidades, seja menor, isto é, que o efeito *shear-lag* seja atenuado.”. Este efeito é definido pela distribuição não uniforme da tensão normal devida à flexão, o que é provocado pelas deformações associadas ao corte.

A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 173) define largura efetiva da laje como:

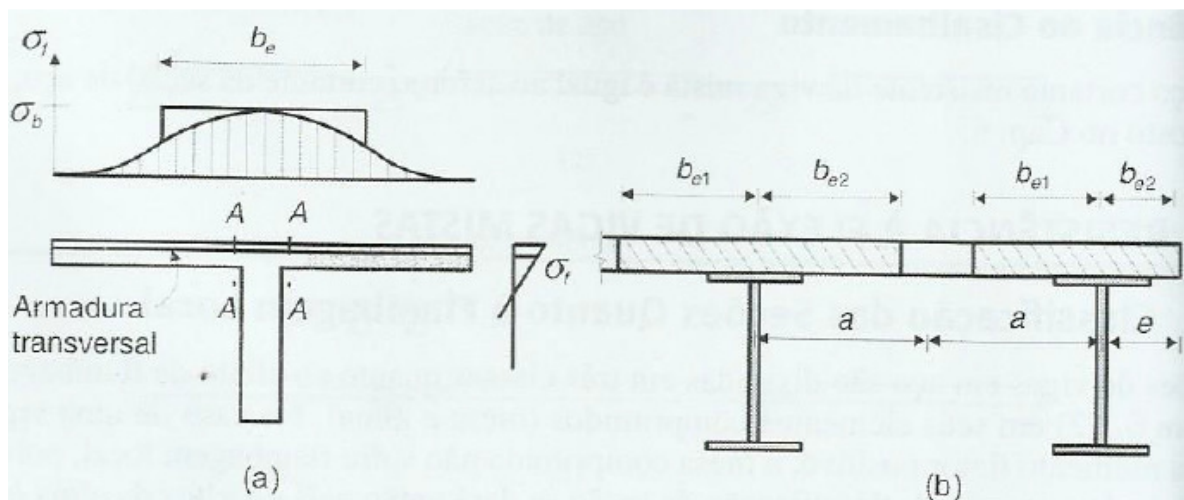
A largura efetiva da mesa de concreto (b_e), de cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ao menor dos seguintes valores:

- a) 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centros dos apoios;
- b) metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente (a);

c) distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço (e).

A figura 4 (a) mostra o decréscimo das tensões axiais devido ao afastamento do eixo da viga, efeito *shear lag*. Para a obtenção da largura efetiva do sistema misto, é ilustrado como determinar as variáveis mencionadas acima. Ainda nesta figura, $b_e\sigma_b$ representa o esforço de compressão total na mesa. A figura 4 (b) são indicadas as parcelas da largura efetiva b_{e1} e b_{e2} de cada lado da linha do centro da viga e devem ser tomadas como o menor valor indicados nas alíneas a), b) e c).

Figura 4 – (a) Tensões normais na laje comprimida, (b) largura efetiva da laje



(fonte: PFEIL; PFEIL, 2009, p. 274)

4.2 SEÇÃO HOMOGENEIZADA

De acordo com a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 169) para o cálculo das propriedades geométricas no regime elástico, é feita a homogeneização da seção transversal transformando a área de concreto em área de aço equivalente conforme figura 5, ou seja, a largura efetiva de concreto é reduzida pelo fator α . A fórmula 1 mostra esta razão desprezando a participação do concreto na zona tracionada.

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c} \quad (\text{fórmula 1})$$

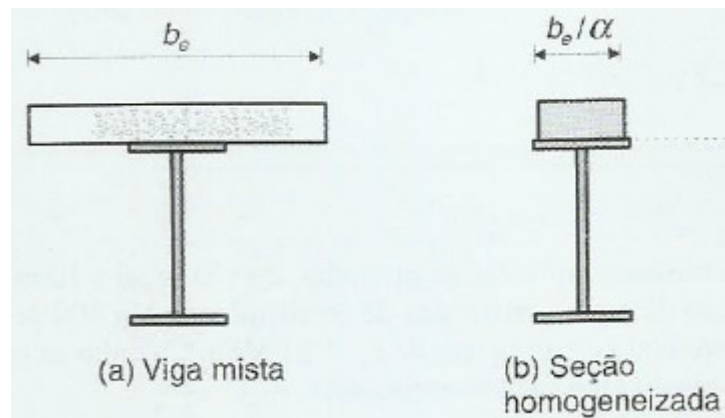
Sendo:

α = razão modular;

E_s = módulo de elasticidade do aço;

E_c = módulo de elasticidade do concreto.

Figura 5 – Seção homogeneizada



(fonte: PFEIL; PFEIL, 2009, p. 275)

4.2.1 Efeitos de curta duração

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 24) quando não forem feitos ensaios para estimar o valor do módulo de elasticidade inicial do concreto (E_{c0}), pode-se utilizar a fórmula 2.

$$E_{c0} = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{fórmula 2})$$

O módulo de deformação secante a ser utilizado nas análises elásticas que possui um coeficiente de redução de 0,85 devido a uma possível não linearidade entre tensão e deformação, é definido por:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{c0} \quad (\text{fórmula 3})$$

Sendo:

E_{c0} = módulo de elasticidade inicial do concreto (MPa);

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto (MPa);
 f_{ck} = resistência característica do concreto (MPa).

4.2.2 Efeitos de longa duração

Pfeil e Pfeil, (2009, p. 276) afirma que, “Para cargas de longa duração deve-se levar em conta o efeito de fluência do concreto [...]” conforme equações abaixo.

A fórmula 4 mostra que a deformação plástica ε_{cc} , deformação por fluência no tempo ∞ , vale φ vezes a deformação elástica para cargas permanentes:

$$\varepsilon_{c\infty} = \varepsilon_{c0} + \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0}(1 + \varphi) \quad (\text{fórmula 4})$$

Reescrevendo a equação $E = \sigma/\varepsilon$ e fazendo as devidas substituições da fórmula 4, é possível chegar na fórmula 6:

$$E_{c\infty} = \frac{E_{c0}}{1 + \varphi} \quad (\text{fórmula 5})$$

Substituindo a razão modular da fórmula 1, encontra-se:

$$\alpha_{\infty} = \frac{E_s}{E_{c0}} \cdot (1 + \varphi) \quad (\text{fórmula 6})$$

A partir da fórmula 6, é possível determinar a razão modular após alguns anos de atuação da carga (α_{∞}):

$$\alpha_{\infty} = \alpha(1 + \varphi) \quad (\text{fórmula 7})$$

Sendo:

$\varepsilon_{c\infty}$ = deformação total;
 ε_{co} = deformação elástica;
 ε_{cc} = deformação plástica;
 φ = coeficiente de fluência.

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 212) define valores numéricos usuais para a determinação da fluência (φ). Para um ambiente ao ar livre, umidade de 70% e abatimento de cone de 5 a 9 cm que representa a base superior do molde ao centro da base da amostra, pode-se adotar $\varphi = 2$.

Reescrevendo a fórmula 7:

$$\alpha_{\infty} = \alpha(1 + 2) = 3\alpha \quad (\text{fórmula 8})$$

Desta maneira Alva e Malite (2005, p. 59), também afirmam que, “[...] os efeitos da retração e fluência podem conduzir a deformações por carregamentos de longa-duração significativamente maiores que a sua deformação instantânea.”.

5 ESTADO LIMITE ÚLTIMO – ELU

No dimensionamento de vigas mistas biapoiadas é necessário calcular o momento resistente e a força cortante resistente da seção. A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) divide sua formulação em seção de aço compacta, critérios de cálculo no regime plástico, e seção de aço semicompacta, critérios de cálculo no regime elástico. Abaixo, será apresentado o equacionamento da resistência dos elementos submetidos a flexão considerando construção não escorada, ou seja, o perfil metálico precisa resistir todas as cargas na etapa de construção, antes de o concreto atingir $75\% f_{ck}$. O APÊNDICE A desse trabalho apresenta dois fluxogramas mostrando todos os passos para a determinação do momento resistente.

Na determinação do esforço cortante resistente de uma seção mista deve ser considerada apenas a resistência do perfil metálico conforme NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 189), como pode ser visto na fórmula 9:

$$V_{d\ res} = \frac{A_w \cdot 0,6 \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{fórmula 9})$$

Sendo:

A_w = área da alma da seção de aço;

f_y = tensão de escoamento do aço;

γ_{a1} = coeficiente de minoração da resistência do aço estrutural.

5.1 SEÇÃO DE AÇO COMPACTA COM LIGAÇÃO TOTAL

De acordo com item 3.2.2, se h/t_w for igual ou inferior a $3,76\sqrt{E/f_y}$, é considerada seção compacta. Nesta situação não ocorre flambagem local da alma e as seções podem ser dimensionadas no regime plástico. Como a mesa superior estará ligada com a laje não ocorrerá flambagem local, dispensando esta verificação.

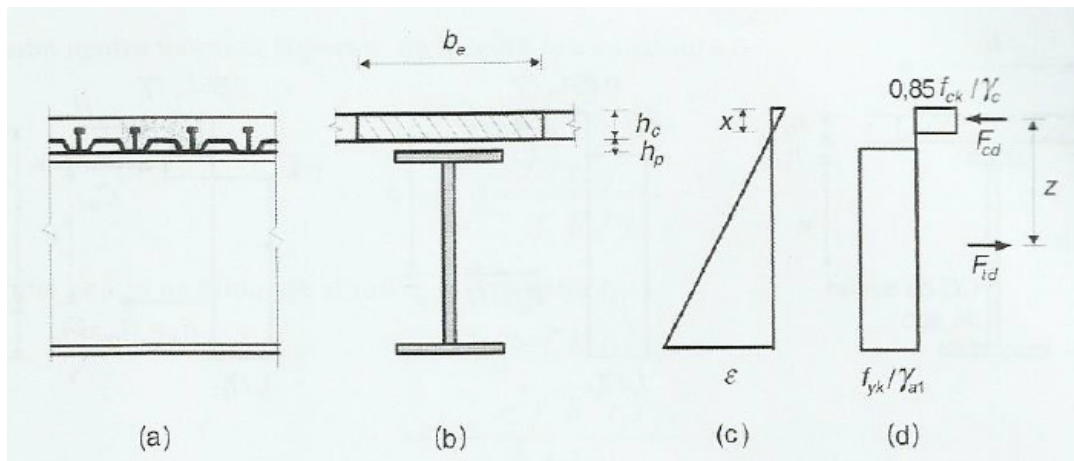
Em uma seção compacta, item 3.2.2, com ligação total, não pode existir deslizamento entre o aço e o concreto. Pfeil e Pfeil (2009, p. 278) afirmam que “[...] a resistência é determinada pela plastificação do concreto ou da seção de aço, e não pela resistência dos conectores.”.

Para que ocorra ligação total é preciso garantir um número mínimo de conectores ao longo do comprimento da viga, de forma que o somatório da resistência de cada conector seja superior ao esforço cisalhante da seção mista. Este assunto será mais detalhado no item 5.2.2.

5.1.1 Fôrmas com nervuras perpendiculares à seção de aço

A figura 6 mostra a seção transversal de uma viga mista com fôrma de aço incorporada na qual possui uma camada de concreto de altura h_c e altura da nervura h_p . No diagrama de deformações, é possível verificar a seção trabalhando em conjunto, com uma profundidade de concreto comprimida $x < h_c$, o concreto no interior da nervura não é considerado, pois as mesmas encontram-se perpendiculares ao perfil de aço.

Figura 6 – (a) Elevação da viga, (b) seção transversal, (c) diagrama de deformações com ligação total, (d) diagrama de tensões em regime plástico



(fonte: PFEIL; PFEIL, 2009, p. 279)

A partir da figura 6.d, momento resistente pode ser calculado pela fórmula 10, tanto para linha neutra na camada de concreto como na seção de aço, considerando que os materiais estão sob tensão correspondente à tensão de escoamento de cada material (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 279):

$$M_{d\ res} = F_{cd} \cdot z = F_{td} \cdot z \quad (\text{fórmula 10})$$

Sendo:

F_{cd} = resultante da tensão de compressão;

F_{td} = resultante da tensão de tração;

z = braço de alavanca, distância entre F_{cd} e F_{td} .

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009, p. 278) o equilíbrio das forças na seção transversal em análise permite definir a posição da linha neutra plástica:

$$\Sigma F = 0 \therefore F_{cd} = F_{td} \quad (\text{fórmula 11})$$

A resistência de compressão no concreto acima das nervuras (R_{cd}) e a resistência de tração na seção de aço (R_{td}), são definidas pelas fórmulas 12 e 13.

O maior valor da resistência à compressão no concreto (R_{cd}) é dado por:

$$R_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_e \cdot h_c \quad (\text{fórmula 12})$$

Sendo:

γ_c = coeficiente de minoração da resistência do concreto;

b_e = largura efetiva da laje;

h_c = altura da camada de concreto acima das nervuras;

A resistência de compressão do concreto é multiplicada por um coeficiente 0,85 de f_{ck} , corresponde aos efeitos de longa duração (efeito Rüsçh). Está associado à redução da resistência do concreto conforme a velocidade de aplicação das cargas.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009, p. 278) o maior valor da resistência de tração (R_{td}) é dado por:

$$R_{td} = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{a1}} \quad (\text{fórmula 13})$$

Sendo:

γ_{a1} = coeficiente de minoração da resistência do aço estrutural;

A = área do perfil metálico.

Com o equilíbrio das forças mencionadas é possível concluir que (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 279):

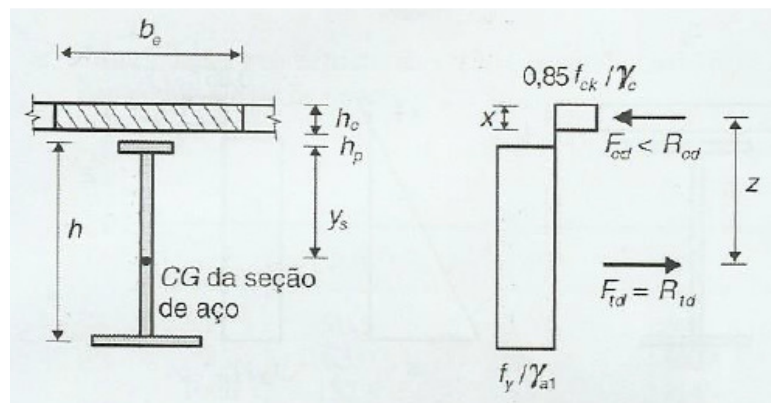
- a) se $R_{cd} \geq R_{td}$, a linha neutra plástica está na laje de concreto ou na interface;
- b) se $R_{cd} < R_{td}$, a linha neutra plástica está na seção de aço.

5.1.1.1 Linha neutra plástica na laje de concreto

Situação correspondente à configuração de resistência com $R_{cd} \geq R_{td}$ para seção mista.

A figura 7 mostra as forças resultantes de uma seção mista submetida a momento positivo. É possível analisar que a camada de concreto na região da nervura foi desconsiderada, respeitando assim a condição de laje com forma de aço incorporada perpendicular ao perfil de aço.

Figura 7 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na camada de concreto



(fonte: PFEIL; PFEIL, 2009, p. 280)

Quando a linha neutra está entre a nervura da fôrma de aço e o topo da laje, apenas o concreto contribui para a resultante de compressão ($F_{cd} < R_{cd}$) e a força resultante de tração é igual a força resistente de tração da seção de aço ($F_{td} = R_{td}$), podendo ser expressa por:

$$F_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_e \cdot x \quad (\text{fórmula 14})$$

Sendo:

x = profundidade da seção de concreto comprimida.

Substituindo as fórmulas 13 e 14 na fórmula 11 obtém-se a profundidade da linha neutra plástica x :

$$x = \frac{f_y \cdot A / \gamma_{a1}}{0,85 \cdot f_{ck} \cdot b_e / \gamma_c} < h_c \quad (\text{fórmula 15})$$

De acordo com a fórmula 10, a determinação do momento resistente, neste caso, é feita pelo somatório de momentos em relação ao ponto de aplicação de F_{cd} , metade da altura comprimida de concreto. O braço de alavanca z é representado pela profundidade do centroide da seção de aço subtraído da metade da altura de concreto comprimida, conforme fórmula 16:

$$M_{d\ res} = R_{td} \cdot z = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{a1}} \left(y_s + h_p + h_c - \frac{x}{2} \right) \quad (\text{fórmula 16})$$

Sendo:

y_s = distância do centro de gravidade do perfil à borda superior da mesa comprimida;

h_p = altura da nervura da fôrma de aço incorporada;

h_c = espessura da camada de concreto;

5.1.1.2 Linha neutra plástica na seção de aço

Situação correspondente à configuração de resistência com $R_{cd} < R_{td}$ para seção mista.

Para este caso, Pfeil e Pfeil (2009, p. 280) mostram que, “[...] uma parte da seção de aço está comprimida em uma altura y , contribuindo com uma força C_{ad} para a resultante de compressão F_{cd} [...]”:

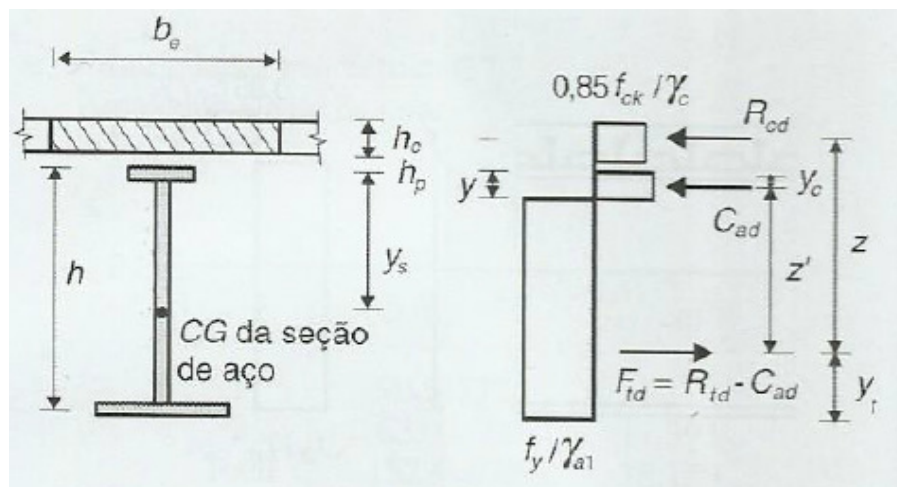
$$F_{cd} = R_{cd} + C_{ad} \quad (\text{fórmula 17})$$

Como existe uma parte da seção de aço que está comprimida $F_{td} < R_{td}$, logo a força resultante de tensão de tração fica:

$$F_{td} = R_{td} - C_{ad} \quad (\text{fórmula 18})$$

A figura 8, mostra as forças resultantes de uma seção mista submetida a momento positivo. Neste caso aparece uma força adicional de compressão C_{ad} , referente à região comprimida na seção de aço.

Figura 8 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na seção de aço



(fonte: PFEIL; PFEIL, 2009, p. 280)

Substituindo as fórmulas 17 e 18 na fórmula 11 encontra-se a contribuição da seção de aço comprimida:

$$C_{ad} = \frac{1}{2}(R_{td} + R_{cd}) \quad (\text{fórmula 19})$$

De acordo com a fórmula 10, a determinação do momento resistente, é feita pelo somatório de momentos em relação ao ponto de aplicação de F_{td} , que é dado pela fórmula 20 em forma genérica, pois a LN ainda pode estar em duas regiões do perfil, como será mostrado a seguir:

$$M_{d\ res} = R_{cd} \cdot z + C_{ad} \cdot z' = R_{cd} \left(h - y_t + h_p + \frac{h_c}{2} \right) + C_{ad}(h - y_t - y_c) \quad (\text{fórmula 20})$$

Sendo:

C_{ad} = força resistente de cálculo da região comprimida da seção de aço;

z' = braço de alavanca de C_{ad} ;

h = altura do perfil metálico;

y_t = distância do centro de gravidade da seção de aço tracionada à borda inferior;

y_c = distância do centro de gravidade da seção de aço comprimida à borda superior;

y = posição da linha neutra plastificada à borda superior do perfil de aço.

A linha neutra pode estar ainda em duas faixas, conforme Pfeil e Pfeil (2009, p. 280-281):

a) linha neutra na mesa superior, de largura b_f e espessura t_f .

$$C_{ad} < \frac{f_y \cdot b_f \cdot t_f}{\gamma_{a1}} \quad (\text{fórmula 21})$$

Neste caso, a resultante de compressão no aço é menor que a força de compressão na mesa superior. Para determinar a altura comprimida na mesa substitui-se t_f por y conforme fórmula 22:

$$y = \frac{C_{ad}}{f_y \cdot b_f / \gamma_{a1}} \quad (\text{fórmula 22})$$

Sendo:

y = profundidade da região comprimida na mesa superior.

A determinação de y_t e y_c pode ser feita a partir do peso e da localização do centro de gravidade de cada parte da seção de aço.

$$y_t = \frac{\frac{b_f \cdot t_f^2}{2} + h_0 \cdot t_0 \left(\frac{h_0}{2} + t_f \right) + b_f (t_f - y) \left(\frac{t_f - y}{2} + h_0 + t_f \right)}{A_t} \quad (\text{fórmula 23})$$

Sendo:

A_t = área tracionada da seção de aço.

O y_c neste caso será a metade da profundidade comprimida.

b) linha neutra na alma, de altura h_0 e espessura t_0

A fórmula 24 mostra a força de compressão na seção de aço. O primeiro termo representa a força de compressão de toda a mesa do perfil e o segundo termo representa a força de compressão na alma do perfil.

$$C_{ad} = \frac{f_y \cdot b_f \cdot t_f}{\gamma_{a1}} + \frac{(y - t_f) \cdot t_0}{\gamma_{a1}} \quad (\text{fórmula 24})$$

Neste caso, a resultante de compressão na seção de aço é maior que a força de compressão na mesa superior. Para achar a altura comprimida na alma é feito uma subtração entre as forças da mesa e da alma do perfil metálico. Isolando y na fórmula 24 é possível determinar a região comprimida:

$$y = \frac{C_{ad} - f_y \cdot b_f \cdot t_f / \gamma_{a1}}{f_y \cdot t_0 / \gamma_{a1}} + t_f \quad (\text{fórmula 25})$$

Sendo:

y = profundidade da região comprimida na alma.

Para a determinação de y_t e y_c é preciso fazer um reajuste na fórmula 23, conforme segue a abaixo:

$$y_t = \frac{(b_f \cdot t_f) \cdot (2t_f + h_0) + t_0(h_0 - y) \left(\frac{h_0 - y}{2} + t_f \right)}{A_t} \quad (\text{fórmula 26})$$

A profundidade da região comprimida y_c neste caso pode ser definida pela fórmula 27.

$$y_c = \frac{\frac{b_f \cdot t_f^2}{2} + t_0(y - t_f) \left(t_f + \frac{y}{2} \right)}{A_c} \quad (\text{fórmula 27})$$

Sendo:

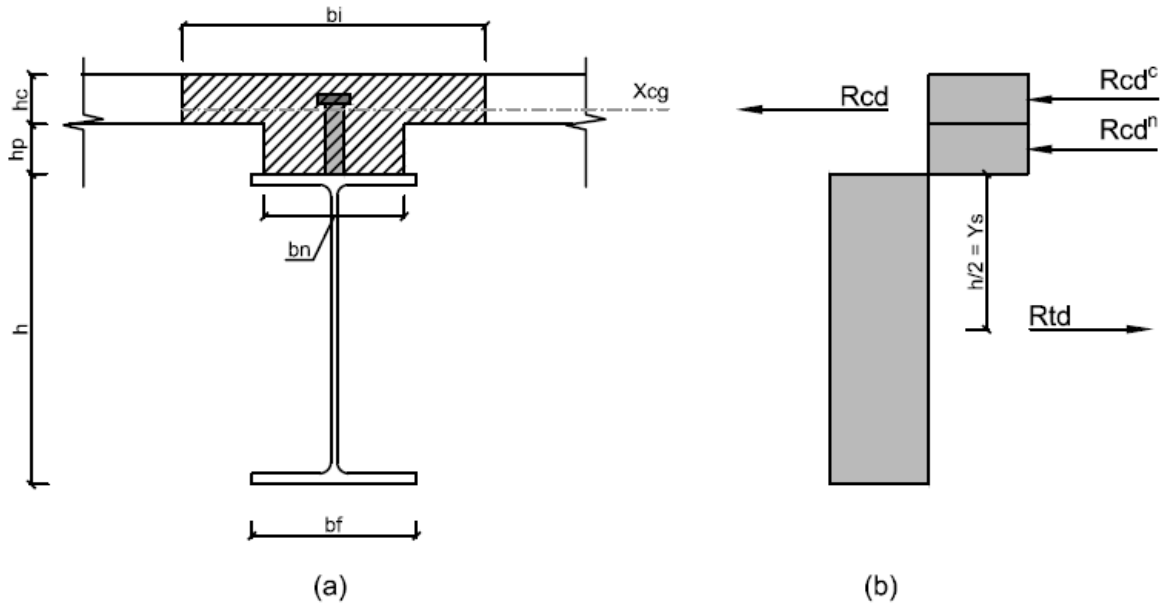
A_c = área comprimida da seção de aço.

5.1.2 Fôrmas com nervuras paralelas à seção de aço

A figura 9 mostra a seção transversal de uma viga mista com fôrma de aço incorporada onde as nervuras estão paralelas ao perfil metálico. De acordo com a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 188), é possível aproveitar a área de concreto dentro da nervura, desde que seja feito os ajustes adequados nas fórmulas. Desta maneira, a força de compressão de concreto será aplicada no centroide do conjunto camada e nervura de concreto.

O equacionamento deste item foi elaborado pelo próprio autor, pois durante a pesquisa bibliográfica para a elaboração deste trabalho foi encontrado muito pouco material que abordava o assunto de maneira completa.

Figura 9 – Seção transversal de viga mista com fôrmas de aço com nervuras paralelas a seção de aço (a) resistências máximas compressão e tração (b) diagrama de forças máximas



(fonte: elaborado pelo autor)

Para a dedução das fórmulas referentes ao item 5.1.2, foi feita uma adaptação na geometria da fôrma de aço, na região da nervura, com a intenção de facilitar os cálculos. A nervura original com sua forma trapezoidal foi transformada na forma retangular. Esta adaptação considerou uma largura média entre a largura superior e a largura inferior da nervura, mantendo a mesma área original. Com isso, a seção transversal da nervura na forma retangular, tornou-se a favor da segurança, pois o centroide da região de concreto ficou mais próximo do centroide da seção de aço, diminuindo assim o momento resistente da seção mista.

A força resultante de resistência máxima que a seção pode obter é dada pela fórmula abaixo:

$$R_{cd} = R_{cd}^c + R_{cd}^n \quad (\text{fórmula 28})$$

Sendo:

R_{cd}^c = resistência do concreto acima da fôrma de aço;

R_{cd}^n = resistência do concreto na nervura da fôrma de aço.

A partir da fórmula 12, é possível adaptar a força resultante para um módulo de nervura com largura bi . Este módulo é multiplicado pelo fator n (be/bi), que corresponde à razão entre a largura efetiva be e a largura do módulo bi .

$$R_{cd}^c = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \cdot hc \cdot b_e \quad (\text{fórmula 29})$$

Sendo:

h_c = espessura da camada de concreto.

$$R_{cd}^n = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \cdot hp \cdot b_n \cdot n \quad (\text{fórmula 30})$$

Sendo:

b_n = largura da nervura.

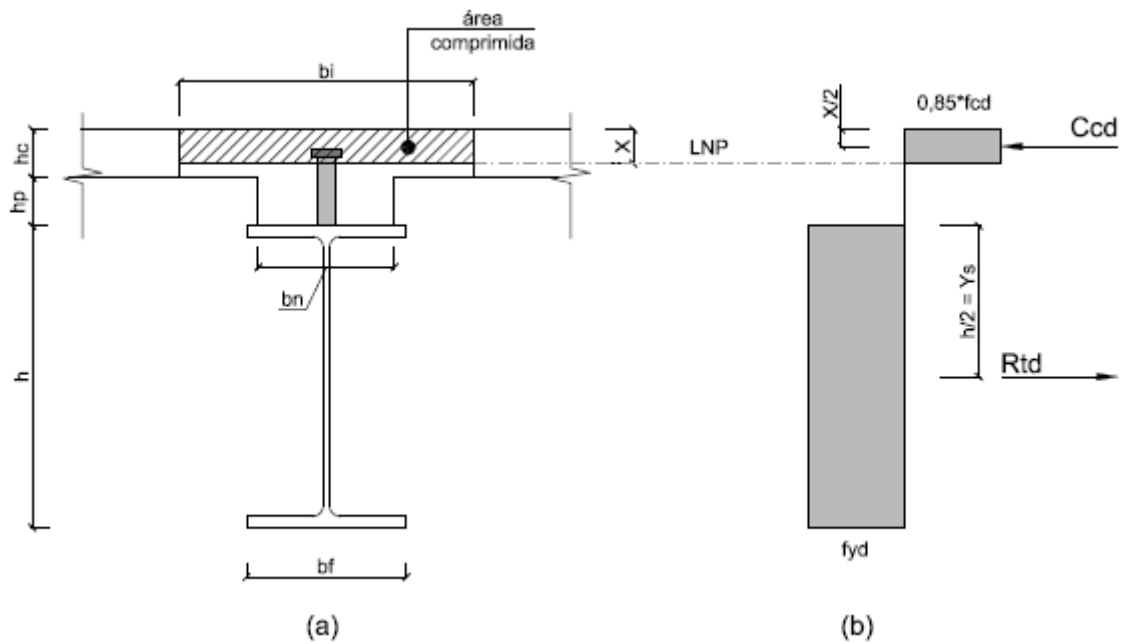
5.1.2.1 Linha neutra plástica na laje de concreto

Para este caso existem duas possibilidades.

5.1.2.1.1 LNP acima do topo da nervura

Se $R_{cd}^c \geq R_{td}$, ou seja, $x \leq hc$. Situação em que a resistência atuante do concreto é menor ou igual que a resistência máxima da região acima da nervura.

Figura 10 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na camada de concreto
(a) seção transversal, (b) diagrama de tensões



(fonte: elaborado pelo autor)

$$C_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \cdot x \cdot b_i \cdot n \quad (\text{fórmula 31})$$

Sendo:

C_{cd} = resistência do concreto atuante.

Igualando a resistência atuante do concreto com a resistência máxima de tração na seção de aço, é possível determinar a profundidade da LNP.

$$x = \frac{R_{td}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_e} \quad (\text{fórmula 32})$$

Sendo:

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto;

R_{td} = resistência máxima da seção de aço;

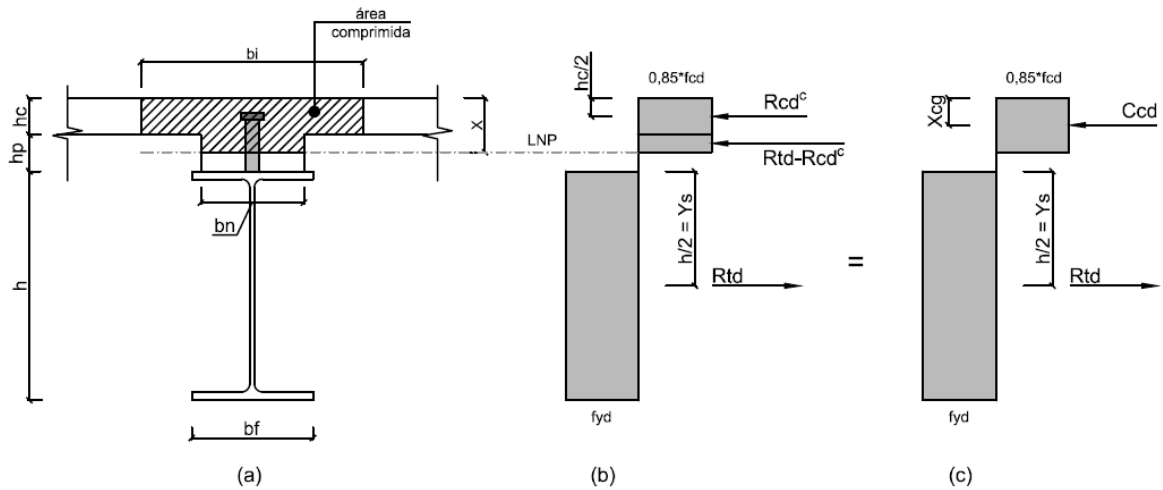
b_i = largura da nervura.

Para a determinação do momento resistente, vale a fórmula 16.

5.1.2.1.2 LNP entre o topo da nervura e o topo da seção de aço

Se $R_{cd}^c < R_{td} \leq R_{cd}$, ou seja, $hc < x \leq (hc+hp)$. Situação em que a resistência atuante do concreto é menor ou igual que a resistência máxima de compressão que a seção pode obter.

Figura 11 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na nervura de concreto (a) seção transversal, (b) diagrama de tensões (c) compressão atuante aplicada no centroide



(fonte: elaborado pelo autor)

$$C_{cd} = R_{cd}^c + 0,85 \cdot f_{cd} \cdot (x - hc) \cdot b_n \cdot n \quad (\text{fórmula 33})$$

Sendo:

C_{cd} = resistência do concreto atuante;

x = profundidade da seção de concreto comprimida;

h_c = espessura da camada de concreto;

b_n = largura da nervura;

n = razão entre b_e e b_i .

Assim como na situação anterior, igualando a resistência atuante do concreto com a resistência máxima de tração na seção de aço, é possível determinar a profundidade da LNP. A mesma estará entre a nervura da fôrma e o topo da seção de aço.

$$x = \frac{R_{td} - R_{cd}^c}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_n \cdot n} + hc \quad (\text{fórmula 34})$$

A definição do momento resistente da seção é dada com o equilíbrio de forças na profundidade da LNP, que se encontra na região da nervura da forma de aço incorporada. A força de compressão atuante será aplicada no centroide da área de concreto, que é dado pelas equações abaixo.

$$C_{cd} \cdot x_{cg} = R_{cd}^c \cdot \frac{hc}{2} + (R_{td} - R_{cd}^c) \cdot \left[hc + \frac{x - hc}{2} \right] \quad (\text{fórmula 35})$$

Sabendo que $C_{cd} = R_{td}$, temos,

$$x_{cg} = \frac{R_{cd}^c \cdot \frac{hc}{2} + (R_{td} - R_{cd}^c) \cdot \left(\frac{x + hc}{2} \right)}{R_{td}} \quad (\text{fórmula 36})$$

$$x_{cg} = \frac{R_{td} \cdot \left(\frac{x + hc}{2} \right) - R_{cd}^c \cdot \frac{x}{2}}{R_{td}} \quad (\text{fórmula 37})$$

$$x_{cg} = \frac{hc}{2} + \frac{x}{2} \cdot \left(1 - \frac{R_{cd}^c}{R_{td}} \right) \quad (\text{fórmula 38})$$

Após a dedução da posição do centro de gravidade da área comprimida de concreto, o momento resistente é dado por:

$$M_{d\ res} = R_{td} \cdot z = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{a1}} \cdot (y_s + h_p + h_c - x_{cg}) \quad (\text{fórmula 39})$$

Sendo:

y_s = distância do centro de gravidade à borda superior da seção de aço;

h_p = altura da nervura da fôrma de aço incorporada;

h_c = espessura da camada de concreto;

x_{cg} = profundidade do centro de gravidade da seção de concreto comprimida.

5.1.2.2 Linha neutra plástica na seção de aço

Na ocorrência desta verificação, a inequação $R_{td} > R_{cd}$ precisa ser verdadeira. Com a utilização da fórmula 19, combinada com a fórmula 31, é possível formar o binário de forças atuantes na seção de aço.

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} \quad (\text{fórmula 40})$$

Sendo:

T_{ad} = resistência de tração atuante do aço;

C_{cd} = resistência de compressão máxima do concreto;

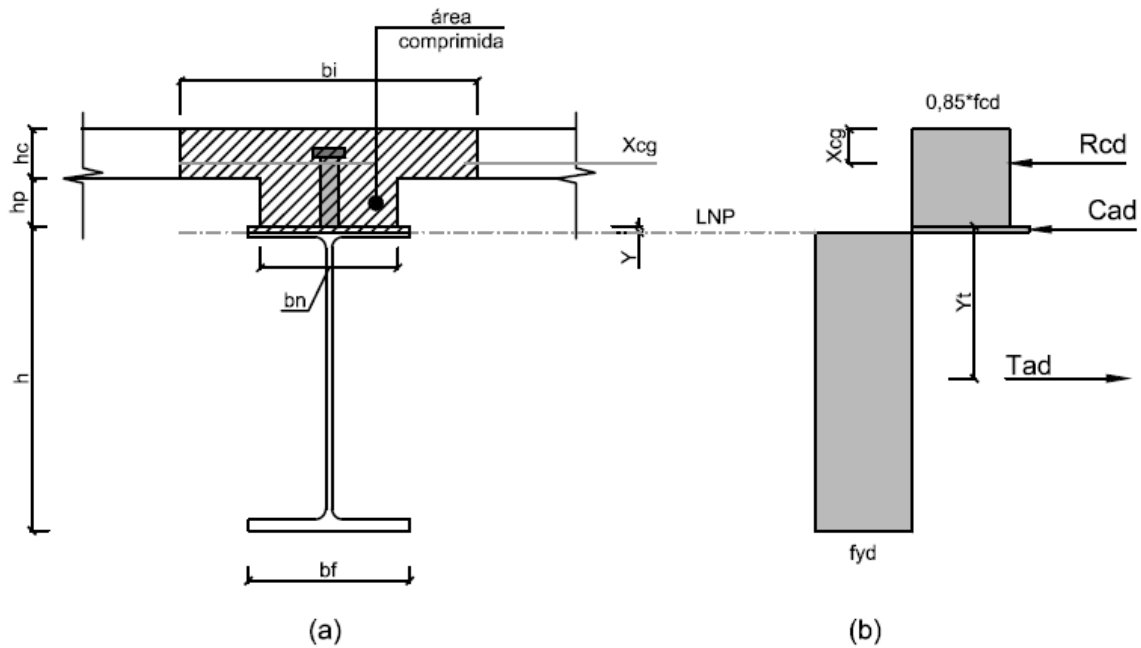
C_{ad} = resistência de compressão atuante do aço.

Para este caso, também existem duas possibilidades.

5.1.2.2.1 LNP na mesa da seção de aço

Se $R_{cd}^f \geq C_{ad}$, ou seja, $y \leq bf$. Situação em que a resistência atuante na mesa superior do perfil é maior ou igual que a resistência de compressão atuante na seção de aço, LNP encontra-se na mesa superior do perfil metálico, como pode ser visto na figura 12.

Figura 12 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na mesa superior
(a) seção transversal, (b) diagrama de tensões



(fonte: elaborado pelo autor)

$$R_{cd}^f = \frac{b_f \cdot t_f \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{fórmula 41})$$

Sendo:

R_{cd}^f = resistência de compressão da mesa do perfil de aço;

b_f = largura da mesa do perfil de aço;

t_f = espessura da mesa do perfil de aço;

f_y = tensão de escoamento do aço.

Para a determinação da profundidade na LNP, y , é possível utilizar a fórmula 22.

A posição do centro de gravidade da seção de aço tracionada, y_t , é medida a partir da borda superior da mesa da seção de aço, conforme mostra a fórmula abaixo.

$$y_t = \frac{R_{cd} \cdot x_{cg} - C_{ad} \cdot y}{2 \cdot T_{ad}} \quad (\text{fórmula 42})$$

Sendo:

x_{cg} = profundidade do centro de gravidade da seção de concreto comprimida ($h_c + h_p$).

$$x_{cg} = \frac{R_{cd}^c \cdot \frac{h_c}{2} + R_{cd}^n \cdot (h_c + \frac{h_p}{2})}{R_{cd}} \quad (\text{fórmula 43})$$

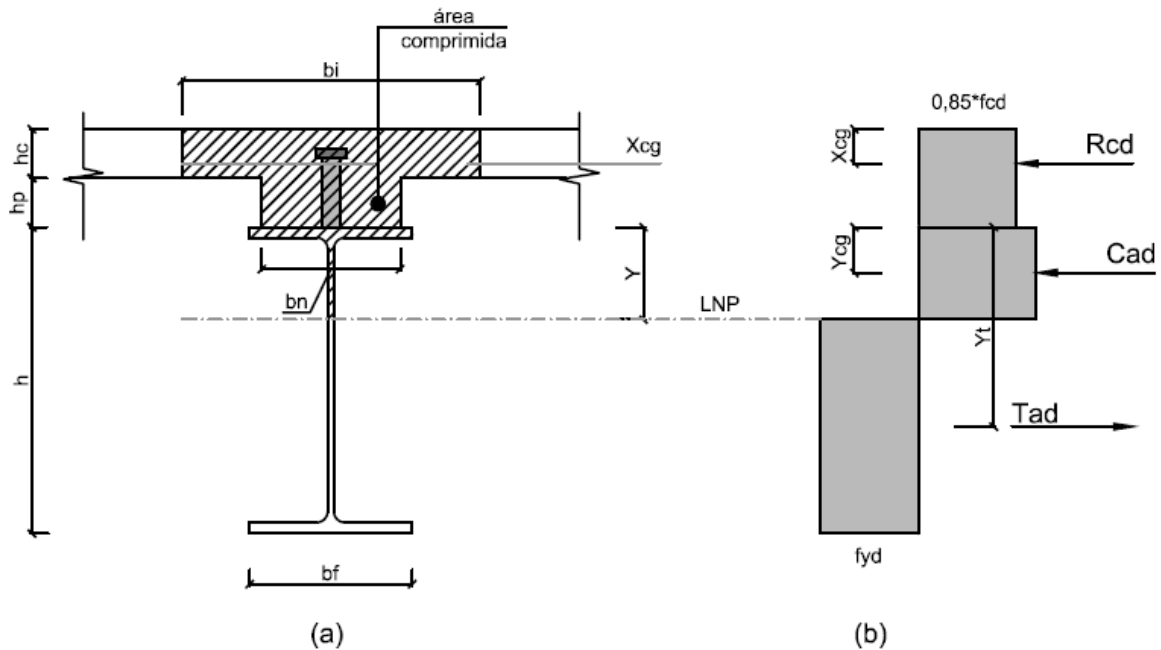
Com as fórmulas 39 e 40, é possível determinar o momento resistente da seção de aço com a LNP na mesa superior do perfil metálico.

$$M_{d\ res} = R_{cd} \cdot (y_t + h_p + h_c - x_{cg}) + C_{ad} \cdot (y_t - \frac{y}{2}) \quad (\text{fórmula 44})$$

5.1.2.2.2 LNP na alma da seção de aço

Se $R_{cd}^f \leq C_{ad}$, ou seja, $y \geq bf$. Situação em que a resistência atuante na mesa superior do perfil é menor ou igual que a resistência de compressão atuante na seção de aço, LNP encontra-se na alma do perfil metálico.

Figura 13 – Distribuição de tensões no ELU de uma seção mista compacta com ligação total e linha neutra plástica na alma do perfil
(a) seção transversal, (b) diagrama de tensões



(fonte: elaborado pelo autor)

Para este caso, a força de compressão atuante na seção de aço pode ser representada pela fórmula abaixo.

$$C_{ad} = R_{cd}^f + t_w(y - t_f) \cdot f_{yd} \quad (\text{fórmula 45})$$

Sendo:

R_{cd}^f = resistência de compressão da mesa do perfil de aço;

t_w = largura da alma;

y = profundidade da LNP;

t_f = altura da mesa;

f_{yd} = resistência de cálculo do escoamento do aço.

Para a determinação da profundidade na LNP, y , é possível utilizar a fórmula 25.

A posição do centro de gravidade da área de aço comprimida, y_{cg} , é medida a partir da borda superior da mesa da seção de aço conforme mostra a fórmula abaixo.

$$y_{cg} = \frac{R_{cd}^f \cdot \frac{t_f}{2} + (C_{ad} - R_{cd}^f) \cdot \left(\frac{y - t_f}{2} + t_f\right)}{C_{ad}} \quad (\text{fórmula 46})$$

Desta maneira, todas as variáveis para o cálculo do momento resistente com a LNP na alma da seção de aço, podem ser encontradas.

$$M_{d\ res} = R_{cd} \cdot (y_{cg} + h_p + h_c - x_{cg}) + C_{ad} \cdot (y_t - y_{cg}) \quad (\text{fórmula 47})$$

5.2 CONECTORES DE CISALHAMENTO

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009, p. 265):

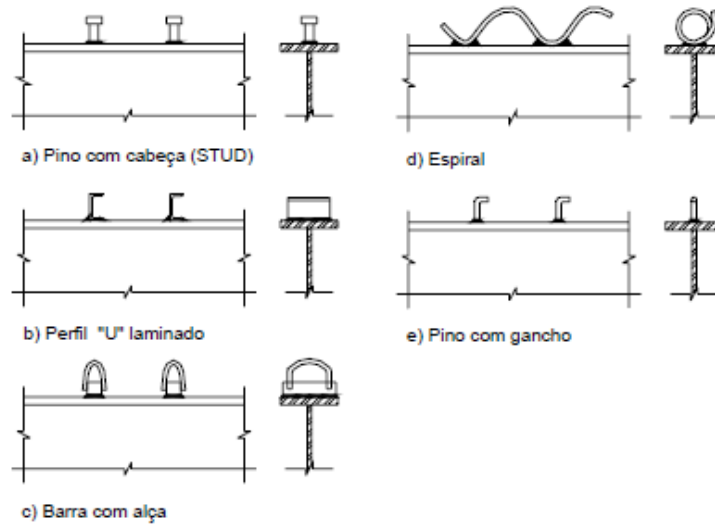
Os conectores de cisalhamento são dispositivos mecânicos destinados a garantir o trabalho conjunto da seção de aço com a laje de concreto. O conector absorve os esforços cisalhantes horizontais que se desenvolvem na direção longitudinal na interface da laje com a mesa superior da seção de aço e ainda impede a separação física desses componentes; [...].

Alva e Malite (2005, p. 52) afirmam que:

Os conectores classificam-se em flexíveis e rígidos. O conceito de rigidez, neste caso, está relacionado com a capacidade de restrição ao escorregamento imposta pela ligação viga de aço/laje de concreto. Os conectores do tipo pino com cabeça são os mais utilizados dentre os flexíveis, na maioria dos países, devido à facilidade de fabricação utilizando o processo de soldagem semi-automático. Além disso, apresentam a mesma resistência em todas as direções.

A figura 14 ilustra alguns dos tipos de conectores mais utilizados, como em a) tipo stud bolt ou pino com cabeça; b) tipo perfil “U” pode ser laminado ou formado a frio, possui procedimento de execução bastante simplificado e o tipo de soldagem mais convencional; c) tipo barra com alça é outro modelo bastante flexível; d) tipo espiral apresenta baixo custo de execução, porém muito flexível; e) tipo pino com gancho, semelhante ao stud bolt, porém não é apresentado pelas normas.

Figura 14 – Tipos usuais de conectores



(fonte: ALVA; MALITE, 2005, p. 52)

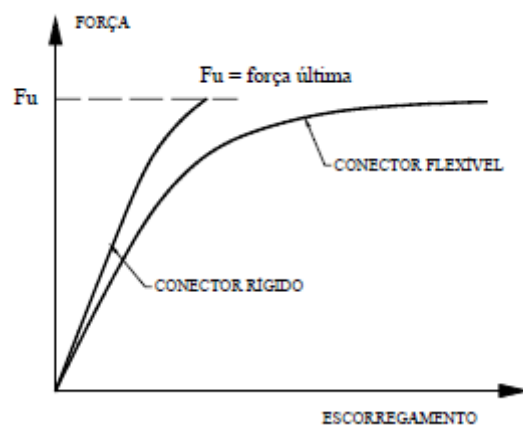
Ainda segundo Alva e Malite (2005, p. 53) pode-se afirmar que:

A característica estrutural mais importante dos conectores de cisalhamento é a relação existente entre a força F transmitida pelo conector e o escorregamento relativo s na interface aço-concreto, determinando seu comportamento dúctil. O diagrama típico de $F \times s$ é ilustrado na figura 15.

A flexibilidade dos conectores, portanto, garante que o colapso de uma viga mista, quando se dá a ruptura da ligação aço-concreto, seja do tipo dúctil.

É possível perceber, pela figura 15, que os conectores flexíveis possuem uma maior capacidade de deformação na seção mista, diferentemente dos conectores rígidos.

Figura 15 – Curva FORÇA x ESCORREGAMENTO para conectores

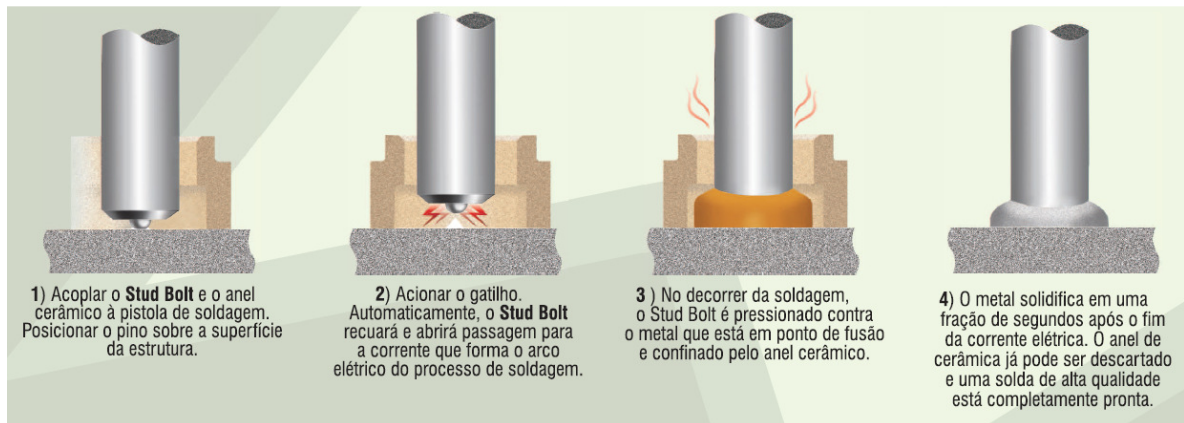


(fonte: ALVA; MALITE, 2005, p. 53)

5.2.1 Processo de soldagem

A soldagem do conector do tipo *stud bolt* é feita por eletrofusão, que é um processo extremamente prático e rápido, utilizando uma pistola especial controlada por temporizador. Na extremidade da peça está engastada uma esfera de fluxo sólido, que serve como desoxidante e estabilizador do arco de solda. Um anel cerâmico, de configuração específica, colocado sobre o conector delimita a área de soldagem. A figura 16 mostra a ilustração destes procedimentos. (CISER, 2014, p. 2)

Figura 16 – Aplicação - soldagem por eletrofusão



(fonte: CISER, 2014, p. 2)

5.2.2 Dimensionamento dos conectores

A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 189) indica que a resistência de cálculo de um conector tipo pino com cabeça é o menor valor entre:

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (\text{fórmula 48})$$

$$Q_{Rd} = \frac{R_g \cdot R_p \cdot A_{cs} \cdot f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (\text{fórmula 49})$$

Sendo:

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

E_c = módulo de elasticidade do concreto;

γ_{cs} = coeficiente parcial de segurança do conector;

f_{ucs} = é a resistência a ruptura do aço do conector;

R_g = considera o efeito do número de conectores em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço igual a 1,0, 0,85 e 0,70 para um, dois e três ou mais conectores, respectivamente;

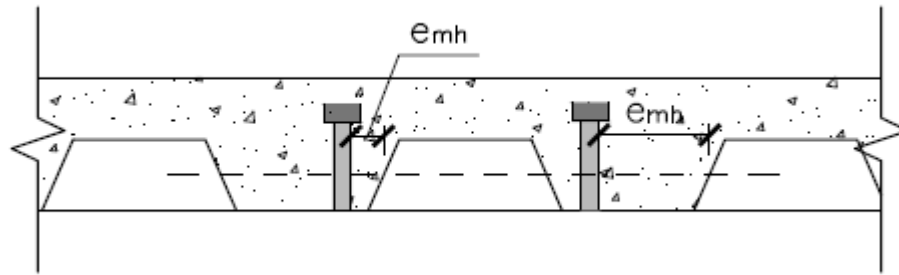
R_p = considera a posição do conector em relação as nervuras.

Para Pfeil e Pfeil (2009, p. 286) a fórmula 48 está relacionada com o apoio do pino no concreto, enquanto a fórmula 49 trata da resistência a flexão do pino dada em termos de cisalhamento aparente.

De acordo com a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 190) para o coeficiente R_p devem-se tomar os seguintes valores:

- a) 1,00, para conectores soldados diretamente no perfil de aço e, no caso de haver nervuras paralelas a esse perfil, pelo menos 50% da largura da mesa deve estar em contato direto com o concreto;
- b) 0,75, (b1) para conectores soldados em uma laje mista com as nervuras perpendiculares ao perfil de aço e emh igual ou superior a 50 mm; (b2) para conectores soldados através de uma fôrma de aço e embutidos em uma laje mista com nervuras paralelas ao perfil de aço;
- c) 0,60, para conectores soldados em uma laje mista com nervuras perpendiculares ao perfil de aço e emh inferior a 50 mm.

Nas alíneas b) e c), emh é a distância da borda do fuste do conector à alma da nervura da fôrma de aço, medida à meia altura da nervura e no sentido da força cortante que atua no conector, conforme figura 17.

Figura 17 – Ilustração do valor a ser tomado para e_{mh} 

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 190)

5.2.2.1 Número de conectores em seção de aço compacta

Pfeil e Pfeil (2009, p. 286-287) definem que:

Nas vigas com seção de aço compacta com ligação total, os conectores são dimensionados de maneira que a viga mista possa atingir seu momento plástico de ruptura, sem a separação entre a laje e a seção de aço. Assim, os conectores são calculados em função da resistência da viga e não das cargas atuantes. A soma das resistências Q_n , dos conectores entre o ponto de momento máximo e um de momento nulo é dada pelo menor valor entre as resistências nominais do concreto em compressão e do aço em tração [...]

Linha neutra plástica na seção de aço:

$$nQ_n \geq 0,85 \cdot f_{ck} \cdot b_e \cdot h_c \quad (\text{fórmula 50})$$

Linha neutra plástica na laje:

$$nQ_n \geq A \cdot f_y \quad (\text{fórmula 51})$$

Sendo:

Q_n = é a resistência nominal de um conector;

n = é o número de conectores.

A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 191) indica que para cargas uniformemente distribuídas, os conectores necessários podem ser uniformemente distribuídos entre a seção de momento máximo e momento nulo. Para cargas concentradas entre estas duas seções, o espaçamento entre os conectores não pode ser inferior a:

$$n_p = n \cdot \left(\frac{M_{P,Sd} - M_{a,Rd}}{M_{Sd} - M_{a,Rd}} \right) \quad (\text{fórmula 52})$$

Sendo:

$M_{P,Sd}$ = é o momento fletor resistente de cálculo na seção da carga concentrada (inferior ao momento resistente de cálculo máximo);

$M_{a,Sd}$ = é o momento fletor resistente de cálculo da viga de aço isolada, para estado limite FLA (flambagem local da alma);

M_{Sd} = é o momento fletor solicitante de cálculo máximo;

n = é o número de conectores a serem colocados entre a seção de momento fletor positivo solicitante de cálculo máximo e a seção adjacente de momento nulo.

5.2.3 Limitações adicionais

A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 192) faz limitações referentes aos conectores de cisalhamento, tipo pino com cabeça, a ser utilizados:

- a) espaçamento máximo de 915 mm, para laje com forma de aço incorporada;
- b) espaçamento mínimo de 6 diâmetros ao longo do vão e de quatro diâmetros na direção transversal ao eixo da viga;
- c) os conectores não podem ter diâmetro maior que 2,5 vezes a espessura da mesa à qual forem soldados, a menos que sejam colocados diretamente na posição correspondente à alma do perfil de aço;
- d) cobertura lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser de no mínimo 25 mm, excetuando-se o caso de conectores colocados em nervuras de formas de aço.
- e) os conectores devem ter comprimento mínimo igual a quatro vezes seu diâmetro.

5.3 LAJES MISTAS – STEEL DECK

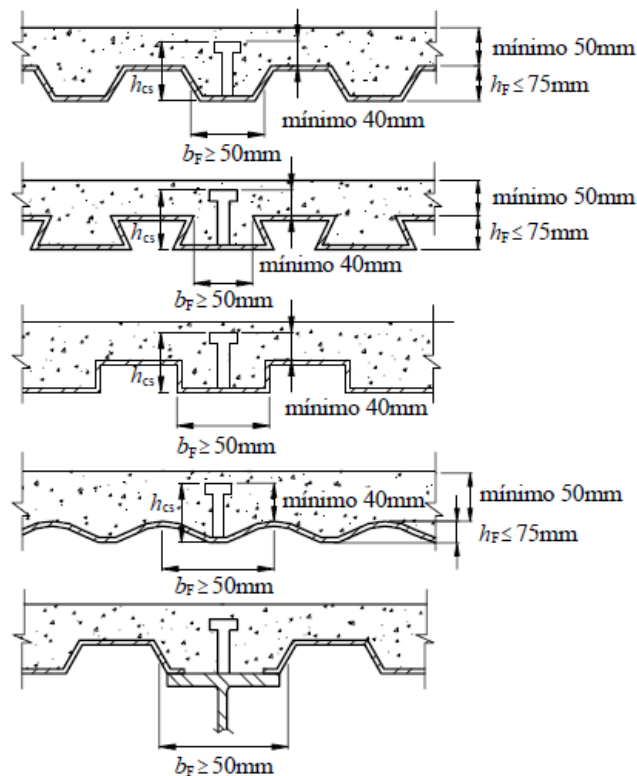
Dias (1997, p. 139) tem a seguinte definição sobre lajes mistas:

O deck de aço consiste em uma forma metálica que suporta o concreto e trabalha também como armadura positiva da laje. O desenho geométrico das chapas, na forma de um trapézio, incrementa as propriedades resistentes efetivas, permitindo alcançar maiores vãos sem apoios intermediários e maior capacidade de carga. Para que o steel deck e o concreto possam trabalhar de forma solidária e conjunta, sem que se destaquem um do outro, são introduzidas na chapa de aço pequenas dobras e moissas durante o processo de conformação do perfil da fôrma.

Para Queiroz et al. (2012a, p. 50), “Lajes mistas de aço e concreto, [...] são aquelas em que a fôrma de aço é incorporada ao sistema de sustentação das cargas, funcionando, antes da cura do concreto, como suporte das ações permanentes e sobrecargas de construção e, depois da cura, como parte ou toda a armadura de tração da laje.”.

A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 188) apresenta alguns tipos de lajes mistas, conforme a figura 18.

Figura 18 – Lajes de concreto com forma de aço incorporada



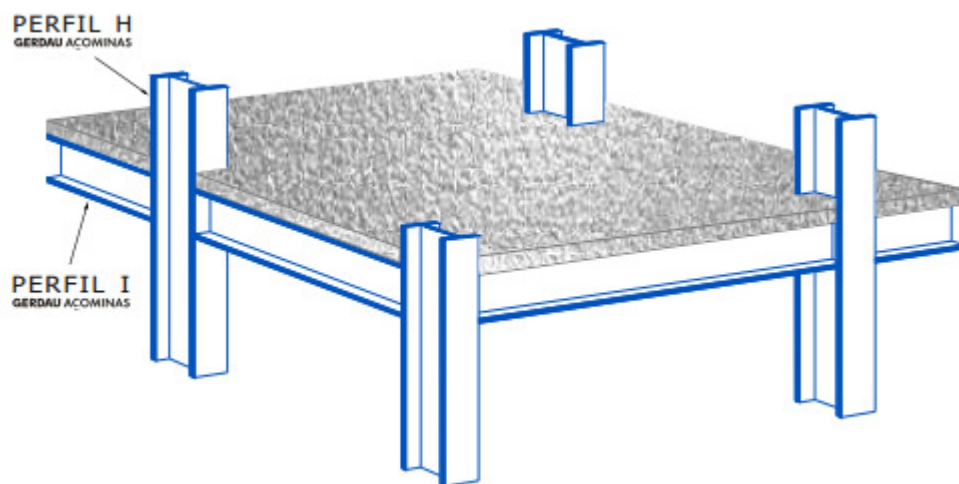
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 188)

Como o trabalho não tem como objetivo dimensionar uma laje com fôrma de aço incorporada, ótima para a situação de cálculo, não será mostrado o equacionamento necessário para este fim. Serão utilizadas tabelas do fabricante para especificar lajes que suportem as cargas de projeto.

5.4 LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO

As lajes maciças de concreto armado, devem ser convenientemente ancoradas às mesas superiores das vigas, através dos conectores, para que façam parte da viga mista. É uma solução muito usual para lajes, no caso de vigas mistas em edifícios de andares múltiplos. Este método construtivo é ainda a solução mais econômica no país. Tem como desvantagem, a exigência de formas e cimbramentos durante a fase de cura (COBRAPI, 1987, p. 18). A figura 19 ilustra esta situação.

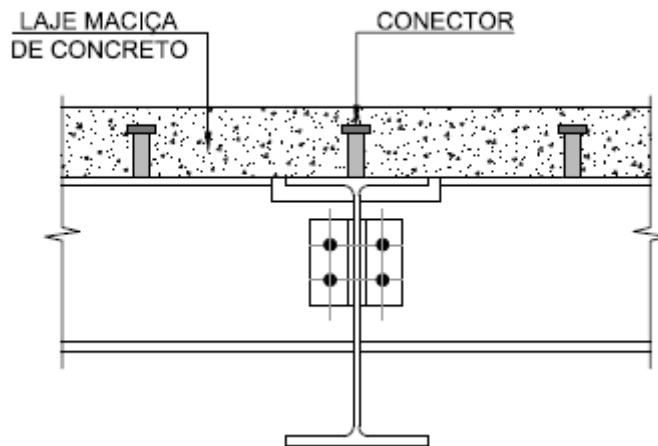
Figura 19 – Lajes de maciça de concreto com estruturas metálicas



(fonte: COELHO, 2007, p. 46)

A figura 20 mostra a ligação dos perfis metálicos com a laje de concreto pelos conectores, caracterizando vigas mistas. A utilização dos conectores fica dispensada caso o sistema construtivo seja viga simples, ou seja, interação nula entre viga e laje.

Figura 20 – Viga mista com laje maciça de concreto



(fonte: elaborado pelo autor)

6 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO – ELS

Neste capítulo, não será abordado a fissuração do concreto e vibrações excessivas. O trabalho tem como foco calcular as deformações imediatas e os efeitos de fluência do concreto impostos pelos carregamentos totais atuantes permanentes e quase-permanentes.

Segundo a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 99), “A ocorrência de um estado limite de serviço pode prejudicar a aparência, a possibilidade de manutenção, a durabilidade, a funcionalidade e o conforto dos ocupantes de um edifício, bem como pode causar danos a equipamento e materiais de acabamento vinculados ao edifício.”.

6.1 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

Queiroz et al. (2012b, p. 20), mostram que:

Na determinação do momento de inércia da viga mista na região de momento positivo [...] deve-se utilizar a razão modular $3E/E_c$ (fórmula 7) para calcular a flecha devida às ações permanentes e às ações variáveis de longa duração; para calcular a flecha devida às ações variáveis de curta duração utiliza-se a razão modular E/E_c (fórmula 1).

No que diz respeito a deslocamentos, Queiroz et al. (2012b, p. 20) afirmam que, “A determinação da flecha pode ser feita considerando regime elástico, desde que a soma das tensões máximas devidas às diversas cargas de tração no perfil de aço isolado e na viga mista, [...] seja inferior a f_y .”.

O equacionamento do momento de inércia da seção mista será apresentado pelo quadro 1 e fórmulas 53 e 54. (QUEIROZ et al. 2012b, p. 10-11).

Quadro 1 – Propriedades elásticas

Elemento	A_i	y_i	A_i*y_i	$A_i*y_i^2$	I_0
Laje	$be*hc/\alpha$	$hc/2$	calcular	calcular	$be*hc^3/12$
seção de aço	A_a	$d/2 + hc$	calcular	calcular	I_a
Σ	calcular	-	calcular	calcular	calcular

(fonte: adaptado de QUEIROZ et al., 2012b, p. 12)

Sendo:

α = razão modular inicial ou final;

A = área do elemento;

y_i = distância do centro de gravidade do elemento ao eixo de referência.

Posição da linha neutra elástica (LNE):

$$y_0 = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{A_i} \quad (\text{fórmula 53})$$

Momento de inércia da seção mista:

$$I_{tr} = \sum(A_i \cdot y_i^2) + \sum I_o - (\sum A_i) \cdot y_0^2 \quad (\text{fórmula 54})$$

Sendo:

I_o = momento de inércia de cada elemento.

6.2 DESLOCAMENTOS MÁXIMOS

A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 117) indica valores máximos de deslocamento de uma edificação para que a mesma não apresente problemas relacionados ao conforto dos usuários.

O cálculo dos deslocamentos em vigas mistas é feito por Pfeil e Pfeil (2009, p. 289-290) da seguinte forma:

No cálculo de deslocamento em vigas mistas, é necessário levar em conta a sequência construtiva, o efeito de fluência e retração do concreto e a condição de resistência no caso de vigas com seção de aço compactas [...], que determina o tipo de comportamento sob cargas em serviço.

Quando não se usam escoras provisórias durante a concretagem da laje, o peso próprio é resistido apenas pela viga metálica, ou seja, as flechas são calculadas com momento de inércia da seção de aço. Havendo escoras provisórias, a carga permanente é resistida pela viga mista, sendo a flecha calculada com o momento de inércia da seção homogeneizada.

Para levar em conta o efeito de fluência do concreto, os deslocamentos são calculados na condição $t = \infty$ (após alguns anos de utilização) com a carga permanente g e valores quase-permanentes de carga variável atuando com efeito de fluência (g_{∞}) e valores frequentes e raro de carga variável q atuando sem efeito de fluência (q_0).

Para a realização deste estudo, que será abordado vigas de piso de pavimento, adota-se $L/350$, onde L é o vão teórico entre os apoios. Este valor trata-se de uma limitação normativa com o fim de evitar deformações pouco estéticas.

7 APLICAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta o dimensionamento de vigas mistas e vigas simples, que formam um pavimento tipo de um edifício. Estas vigas são submetidas a diferentes métodos construtivos, visando a comparação dos resultados.

7.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O pavimento tipo escolhido para representar a situação indicada é o mesmo estudado por Bonini (2013). Esta edificação, que possui características de um edifício residencial de 4 pavimentos, é constituída por um sistema de estrutura mista.

Com o objetivo de comparar a redução das dimensões utilizando um sistema de vigas mistas com a solução de um sistema de vigas simples, são dimensionadas vigas biapoiadas para os critérios de estado limite último e de estado limite de serviço. Para o cálculo das solicitações, por se tratarem de vigas biapoiadas apenas, não é utilizado nenhum *software* específico, sendo as mesmas calculadas via planilha eletrônica.

Para esta configuração são calculadas as vigas que suportam a estrutura, ora por um sistema de vigas mistas que têm como alternância o tipo de laje adotada, ora por um sistema de vigas simples que também é combinado com diferentes tipos de lajes. Esta alternância será entre laje com forma de aço incorporada e laje maciça de concreto, formando assim os quatro métodos construtivos.

O estudo é feito em duas situações. Na primeira, o dimensionamento não tem nenhuma restrição quanta à altura da estrutura (viga + laje), chamado de caso 1, priorizando assim o menor consumo de aço. Na segunda, o dimensionamento fica limitado em uma altura máxima de 40cm (viga + laje), chamado de caso 2. Este caso representa uma eventual restrição geométrica imposta pelo projeto arquitetônico.

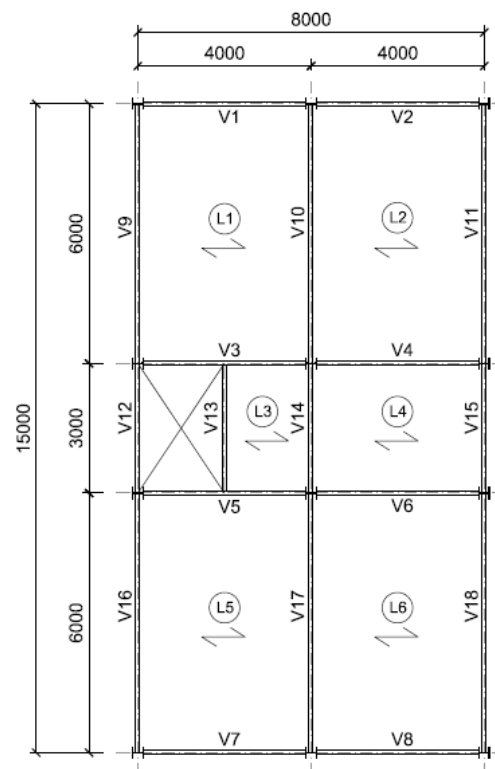
Abaixo apresentam-se os métodos construtivos considerados nos casos 1 e 2:

- a) viga mista com *steel deck*, VM-SD;
- b) viga simples com *steel deck*, VS-SD;
- c) viga mista com laje maciça de concreto, VM-LM;
- d) viga simples com laje maciça de concreto, VS-LM.

De acordo com Bonini (2013), a laje com fôrma de aço incorporada utilizada foi a MF-75 acrescida de uma capa de concreto de 6,5cm resultando em uma altura de 14,0cm. A laje maciça de concreto utilizada foi com uma altura de 8,0cm. Para a simplificação deste trabalho, foram consideradas válidas as verificações referentes às lajes feitas por Benini (2013).

A figura 21 mostra a planta baixa do pavimento escolhido e também são indicadas as lajes e as vigas do mesmo.

Figura 21 – Planta baixa do pavimento tipo (medidas em milímetros)



(fonte: elaborado pelo autor)

7.2 AÇÕES CONSIDERADAS

Como as lajes L1, L2, L5 e L6 possuem a mesma geometria, serão tratadas da mesma forma.

Para a concentração dos resultados, serão estudadas apenas as vigas V9 e V10, pois são os elementos estruturais que apresentam condições mais críticas de resistência e de serviço.

O quadro 2 mostra os valores característicos das ações que as lajes estão submetidas para o caso em estudo.

Quadro 2 – Valores característicos de ações atuantes

Carga	Ação	Valor [kN/m ²]
Drywall	Permanente	0,3
Revestimento	Permanente	0,5
Forro	Permanente	0,2
Tipo	Variável	1,5

(fonte: elaborado pelo autor)

Além dos valores mostrados acima, são acrescentados o peso próprio de cada sistema construtivo adotado e também o peso próprio da alvenaria de vedação nas vigas de borda.

7.2.1 Combinação das ações

Para o cálculo das solicitações de projeto, as ações devem ser combinadas entre si, visando às situações mais desfavoráveis para a estrutura. São realizadas combinações referentes ao estado limite último, que estão ligadas à ruptura ou instabilidade da estrutura e também combinações referente ao estado limite de serviço, que estão associadas ao uso e ao desempenho da estrutura. Estes coeficientes de ponderação dos valores característicos das ações atuantes foram retirados da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 17), item 4.7.6.

Além da ponderação das ações, utiliza-se uma redução nas cargas variáveis. O fator ψ_0 é utilizado para considerar a baixa probabilidade de ocorrência simultânea das ações no estado limite último. Os fatores ψ_1 e ψ_2 são utilizados respectivamente em combinação frequente e combinações quase-permanente, para o estado limite de serviço. Estes valores também foram retirados da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 17), item 4.7.6.

Os quadros seguintes mostram como foram feitas as combinações no ELU e ELS, para os quatro métodos construtivos que serão estudados.

Quadro 3 – Combinações de ações no ELU e ELS para VM-SD

VIGA MISTA STEEL DECK	Combinações de ações para o estado limite último	
	combinação	coeficientes
	1 (construção)	$1,15*(PPsd + PPperfil) + 1,25*PPconc + 1,3*(Constr)$
	2 (t_{∞})	$1,25*(PPsd + PPperfil) + 1,35*PPconc + 1,4*(Perm + Alv) + 1,5*Acid$
	Combinações de ações para o estado limite de serviço	
	combinação	coeficientes
	3 (construção = g1)	$1,0*(PPsd + PPperfil + PPconc)$
4 ($t_{\infty} = g2 + q2$)	$1,0*(Dry + Rev + Forro + Alv) + \psi^*Acid$	

$\psi1 = 0,4$ (combinação frequente de ações)

$\psi2 = 0,3$ (combinação quase-permanente de ações)

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 4 – Combinações de ações no ELU e ELS para VS-SD

VIGA SIMPLES STEEL DECK	Combinações de ações para o estado limite último	
	combinação	coeficientes
	1	$1,25*(PPsd + PPperfil) + 1,35*PPconc + 1,4*(Perm + Alv) + 1,5*Acid$
	Combinações de ações para o estado limite de serviço	
	combinação	coeficientes
2 (g + q)	$1,0*(PPsd + PPperfil + PPconc) + 1,0*(Dry + Rev + Forro + Alv) + \psi^*Acid$	

$\psi2 = 0,3$ (combinação quase-permanente de ações)

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 5 – Combinações de ações no ELU e ELS para VM-LM

VIGA MISTA LAJE MACIÇA	Combinações de ações para o estado limite último	
	combinação	coeficientes
	1	$1,25*(PPperfil) + 1,35*(PPlaje_conc) + 1,4*(Perm + Alv) + 1,5*Acid$
	Combinações de ações para o estado limite de serviço	
	combinação	coeficientes
2 (g + q)	$1,0*(PPperfil + PPlaje_conc + Dry + Rev + Forro + Alv) + \psi^*Acid$	

$\psi2 = 0,3$ (combinação quase-permanente de ações)

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 6 – Combinações de ações no ELU e ELS para VS-LM

VIGA SIMPLES LAJE MACIÇA	Combinações de ações para o estado limite último	
	combinação	coeficientes
	1	$1,25*(PPperfil) + 1,35*(PPlaje_conc) + 1,4*(Perm + Alv) + 1,5*Acid$
	Combinações de ações para o estado limite de serviço	
	combinação	coeficientes
2 (g + q)	$1,0*(PPperfil + PPlaje_conc + Dry + Rev + Forro + Alv) + \psi^*Acid$	

$\psi2 = 0,3$ (combinação quase-permanente de ações)

(fonte: elaborado pelo autor)

Sendo:

$PP_{\text{metálica}}$ = peso próprio do perfil de aço e fôrma de aço incorporada;

Acidental construtiva = carga acidental apenas na etapa de construção;

Permanente = cargas de drywall, revestimento, forro e alvenaria;

g_1 = deformação devida à carga permanente antes de o concreto atingir $75\% f_{ck}$;

$g_2 + q_2$ = deformação devida à carga permanente e acidental após a cura do concreto;

ψ = fator de redução em combinação frequente e combinação quase-permanente de serviço;

7.3 DIMENSIONAMENTOS DAS VIGAS

Este item é dividido em quatro partes, dimensionamento de vigas mistas com laje *steel deck* (VM-SD), dimensionamento de vigas simples, ou seja, interação nula, com laje *steel deck* (VS-SD), o dimensionamento de viga mista com laje maciça de concreto (VM-LM) e o dimensionamento de viga simples com laje maciça de concreto (VS-LM).

O dimensionamento é feito para o caso 1 e o caso 2, com a intenção de comparar e identificar as diferenças entre os métodos construtivos já mencionados anteriormente.

Foi elaborado um cadastro de perfis laminados de uso estrutural para a escolha da seção que mais se adapte à situação de trabalho. Este cadastro teve como referência o fabricante Açominas e são chamados de Perfis W (tipo I). Todas os perfis apresentam seção compacta (item 3.2.2) e possuem limite de escoamento $f_y = 345\text{MPa}$.

O concreto utilizado na laje maciça e no preenchimento da laje com fôrma de aço incorporada é de $f_{ck} = 30\text{MPa}$.

Para todos os dimensionamentos foi de um conector de cisalhamento *stud bolt*, com diâmetro de 22mm e limite de resistência 450MPa do fabricante *CISER*.

7.3.1 Cargas

Neste item são especificadas as cargas nas vigas V9 e V10. Inicialmente as ações aplicadas por área, foram distribuídas pela região de influência de cada viga com a intenção de transformá-las em cargas lineares. A viga V10 por ser central, é mais influenciada por estas ações. Porém, na viga V9 é acrescentada uma carga linear referente à alvenaria de

fechamento, tornando bastante parecido o carregamento final nas duas vigas. Por fim as ações foram combinadas de acordo com os quadros 3, 4, 5 e 6 separando em etapa construtiva e etapa final. Os quadros 7 e 8 apresentam estes carregamentos após as combinações. Cabe destacar que estes são os carregamentos após o dimensionamento das vigas, ou seja, que já estão incluídos os pesos de cada perfil utilizado.

Quadro 7 – Cargas atuantes na viga V9

V9 - cargas [kN/m]				
Sistema construtivo	Casos	ELU		ELS
		Construção	Final	Final
VM-SD	Caso 1	9,65	22,35	15,99
	Caso 2	9,79	22,50	16,10
VS-SD	Caso 1	-	22,50	16,11
	Caso 2	-	22,65	16,23
VM-LM	Caso 1	-	20,47	14,57
	Caso 2	-	20,47	14,57
VS-LM	Caso 1	-	20,61	14,69
	Caso 2	-	20,61	14,69

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 8 – Cargas atuantes na viga V10

V10 - cargas [kN/m]				
Sistema construtivo	Casos	ELU		ELS
		Construção	Final	Final
VM-SD	Caso 1	17,08	29,30	20,96
	Caso 2	17,23	29,45	21,08
VS-SD	Caso 1	-	29,30	20,96
	Caso 2	-	29,66	21,26
VM-LM	Caso 1	-	25,47	18,08
	Caso 2	-	25,47	18,08
VS-LM	Caso 1	-	25,53	18,13
	Caso 2	-	25,60	18,19

(fonte: elaborado pelo autor)

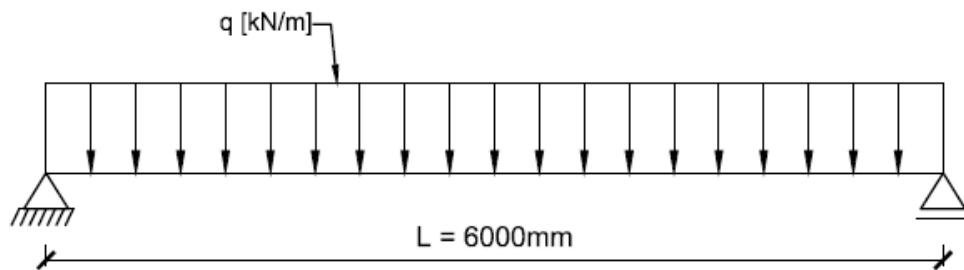
7.3.2 Solicitações

Após a determinação do carregamento em cada viga, foi possível calcular as solicitações de esforço cortante e momento fletor para viga biapoiada.

Não está sendo considerado no modelo de cálculo nenhum esforço horizontal, como por exemplo, o vento, que possa vir a aumentar as dimensões do perfil de aço.

A figura abaixo mostra o modelo considerado para o cálculo das solicitações em todos os dimensionamentos.

Figura 22 – Carregamento típico

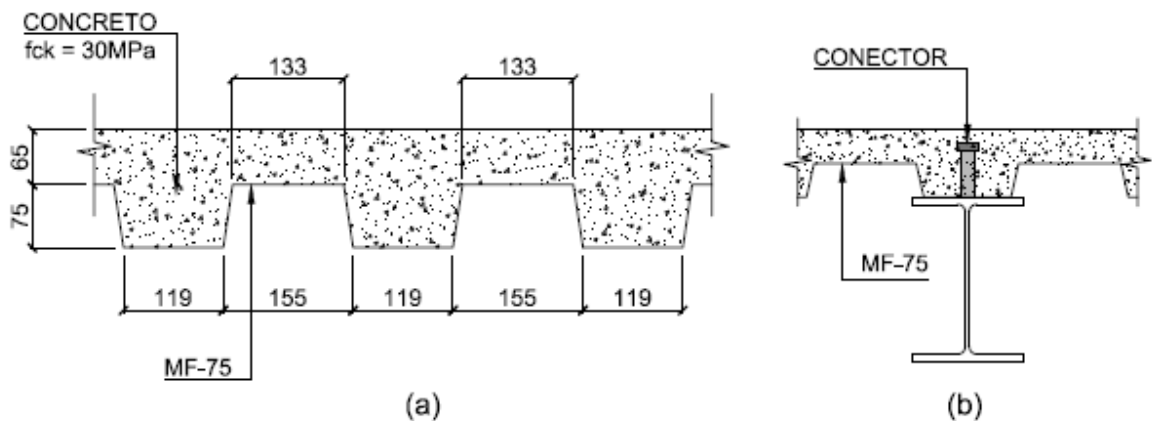


(fonte: elaborado pelo autor)

7.3.3 Vigas mistas com *steel deck*

A determinação da laje mista feita por Bonini (2013), utilizando como fabricante a METAFORM, que especificou a MF-75 com altura total de 14cm, ou seja, 7,5cm de fôrma e mais 6,5cm de capa de concreto, conforme mencionado anteriormente.

Figura 23 – (a) Seção transversal MF-75, (b) seção transversal típica de viga mista com laje *steel deck* (medidas em milímetros)



(fonte: elaborado pelo autor)

7.3.3.1 Cargas do sistema construtivo

Os carregamentos são divididos em duas etapas. Na primeira etapa, a de construção, é considerado o peso próprio da estrutura metálica, o peso do concreto fresco e mais uma carga acidental construtiva. Neste caso, verifica-se no estado limite último a estabilidade da viga sem escoramento, ou seja, se o perfil metálico é capaz de suportar as cargas até o concreto atingir 75% do f_{ck} . Na etapa seguinte, são acrescentadas as cargas permanentes e as acidentais, referentes ao uso da ocupação.

De acordo com o fabricante, o PP da MF-75 fornecida é de 0,15kN/m² e o PP do concreto fresco igual a 2,56kN/m². Com isso, é possível determinar os valores das ações atuantes nas vigas para as duas etapas da obra.

É possível observar nos quadros 7 e 8, comparando caso 1 com caso 2, que as cargas nas vigas são bastante parecidas, mudando apenas o peso próprio do perfil metálico, que é indicado posteriormente.

7.3.3.2 Verificações

Para o desenvolvimento deste item, foi criada uma planilha eletrônica que calcula e verifica todas as exigências da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 168), para etapa de construção e etapa final.

7.3.3.2.1 Etapa construtiva

Neste momento foram verificados o momento resistente e o esforço cortante da seção simples e deformação inicial.

Conforme a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 168) as recomendações aplicáveis são:

- a) construção não-escorada, item O.2.3.2;
- b) resistência ao esforço cortante, item O.3;
- c) deslocamento, item O.1.2.3.

Observa-se nos quadros 9 e 10 que as resistências de momento fletor e esforço cortante estão com bastante folga na suas capacidades de trabalho. No segundo caso, justificando a redução da altura do perfil escolhido, aumentou-se significativamente sua massa. A situação mais

crítica ficou por conta da deformação, que mesmo na etapa inicial já apresentou grandes deslocamentos.

Quadro 9 – Verificações na etapa construtiva para o caso 1

VIGA	PERFIL	CARGA [kN/m]	M _{sd} [kNm]	M _{rd} [kNm]	M _{sd} /M _{rd}	V _{sd} [kN]	V _{rd} [kN]	V _{sd} /V _{rd}	δ/δ _{adm}
V9	W 310 x 21,0	9,65	43,41	91,55	47%	28,94	512,00	6%	73%
V10	W 310 x 32,7	17,08	76,85	151,96	51%	51,23	792,00	6%	84%

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 10 – Verificações na etapa construtiva para o caso 2

VIGA	PERFIL	CARGA [kN/m]	M _{sd} [kNm]	M _{rd} [kNm]	M _{sd} /M _{rd}	V _{sd} [kN]	V _{rd} [kN]	V _{sd} /V _{rd}	δ/δ _{adm}
V9	W 250 x 32,7	9,79	44,07	134,39	33%	29,38	792,00	4%	54%
V10	W 250 x 44,8	17,23	77,53	190,16	41%	51,69	1084,00	5%	78%

(fonte: elaborado pelo autor)

Como a planilha não trabalha com seção ótima e sim com perfis laminados encontrados no mercado, foi necessário arbitrar um perfil e fazer algumas interações até que verificações fossem atendidas.

7.3.3.2.2 Etapa final

Conforme apresentado no quadro 3, neste momento todas as cargas foram consideradas, fazendo as devidas combinações para o estado limite último e o estado limite de serviço.

Conforme a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 168) as recomendações aplicáveis são:

- a) momento resistente, item O.2.3;
- b) resistência ao esforço cortante, item O.3;
- c) conectores de cisalhamento item O.4;
- c) deslocamento, item O.1.2.3.

Nos quadros 11 e 12 foi verificado o ELU e o ELS para os casos 1 e 2. As verificações tornaram-se bastante interativas, com o intuito de encontrar a seção mista que melhor aproveitasse os materiais. Nota-se que a deformação também foi o ponto crítico do dimensionamento, pois apresentou o máximo deslocamento permitido, item 6.2. Outro item

que merece destaque é o aumento do número de conectores da viga V10 entre caso 1 e o caso 2, de 36%. Este acréscimo está ligado ao aumento da área de aço do perfil, consequentemente aumentando a resultante de tração da seção.

Quadro 11 – Verificações na etapa final para o caso 1

VIGA	Estado limite último							Estado limite de serviço	
	M _{sd} [kNm]	M _{rd} [kNm]	M _{sd} /M _{rd}	V _{sd} [kN]	V _{rd} [kN]	V _{sd} /V _{rd}	Nº conectores	δ [cm]	δ/δ _{adm}
V9	100,58	223,70	45%	67,05	512,00	13%	14	1,71	100%
V10	131,84	359,59	37%	87,89	792,00	11%	19	1,65	96%

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 12 – Verificações na etapa final para o caso 2

VIGA	Estado limite último							Estado limite de serviço	
	M _{sd} [kNm]	M _{rd} [kNm]	M _{sd} /M _{rd}	V _{sd} [kN]	V _{rd} [kN]	V _{sd} /V _{rd}	Nº conectores	δ [cm]	δ/δ _{adm}
V9	101,24	274,89	37%	67,49	792,00	9%	14	1,50	88%
V10	132,52	434,84	30%	88,35	1084,00	8%	26	1,55	90%

(fonte: elaborado pelo autor)

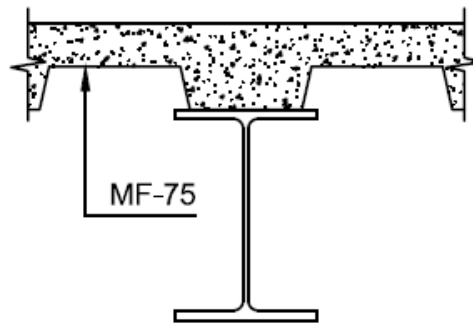
Conclui-se que as vigas estiveram de acordo com as exigências normativas, quando submetidas às duas situações propostas.

7.3.4 Vigas simples com *steel deck*

Para este dimensionamento foi utilizado o mesmo método da laje com fôrma de aço incorporada do item anterior. A particularidade deste método é que não existe uma ligação entre a laje e o perfil de aço, caracterizando a interação nula. Contudo, serão adotados conectores com a função de travamento da laje no perfil. Este sistema construtivo trabalha com escoramento, dispensando as verificações na etapa construtiva.

A figura 24 mostra que os dois elementos não estão ligados, trabalhando separadamente.

Figura 24 – Seção transversal de viga simples



(fonte: elaborado pelo autor)

7.3.4.1 Cargas do sistema construtivo

Os carregamentos foram baseados em apenas uma etapa, considerando o peso próprio da estrutura metálica, o peso do concreto fresco, cargas permanentes e as acidentais, referentes ao uso da ocupação.

De acordo com o fabricante, o PP da MF-75 fornecida é de $0,15\text{kN/m}^2$ e o PP do concreto fresco igual a $2,56\text{kN/m}^2$. Com isso, pode-se determinar os valores das ações atuantes nas vigas para as duas etapas da obra.

As cargas utilizadas, quadros 7 e 8, foram o PP da MF-75 de $0,15\text{kN/m}^2$ e o PP do concreto fresco igual a $2,56\text{kN/m}^2$, alterando apenas o PP do perfil escolhido quando comparado com o sistema construtivo anterior, conforme mostrado pelo quadro 13.

Quadro 13 – Definição dos perfis

Viga	Perfil utilizados	
	Caso 1	Caso 2
V9	W 360 x 32,9	W 250 x 44,8
V10	W 360 x 32,9	W 250 x 62,0

(fonte: elaborado pelo autor)

7.3.4.2 Verificações

Para o desenvolvimento desse item, foi criada uma planilha eletrônica que calcula e verifica todas as exigências da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 47-51). Esse item trata do dimensionamento de vigas que não são mistas. As recomendações aplicáveis são:

- a) momento fletor resistente, item 5.4.2;
- b) resistência ao esforço cortante, item 5.4.3;
- c) deslocamento, item C.3.

Nos quadros 14 e 15 foi verificado ELU e ELS para o caso 1 e o caso 2. Nota-se que a deformação também foi o ponto crítico do dimensionamento, utilizando quase sua capacidade máxima de deslocamento de acordo com o critério normativo estabelecido, item 6.2. O momento resistente nas quatro análises, não foi otimizado em virtude da limitação do ELS. O esforço cortante solicitante ficou bastante abaixo da sua capacidade resistiva, obtendo uma relação média de 10%. Para que a viga V10 no caso 2 atendesse os critérios de verificação, foi preciso aumentar significativamente a área da seção de aço, e ainda assim a sua deformação foi bastante grande. Os conectores foram calculados para promover o travamento da laje com a viga evitando FLT (flambagem lateral com torção). Os mesmos ficaram afastados a uma distância menor ou igual ao comprimento L_p ($r_y \cdot \lambda_p$: raio de giração multiplicado pela esbeltez da seção), ou seja, antes da plastificação total da seção de aço, evitando a flambagem lateral do perfil. A viga ainda poderia receber outros tipos de travamento como, por exemplo, perfis cantoneiras dispensando assim a soldagem por eletrofusão feita entre o conector e a superfície de aço.

Quadro 14 – Verificações para o caso 1

VIGA	Estado limite último							Estado limite de serviço	
	M_{sd} [kNm]	M_{rd} [kNm]	M_{sd}/M_{rd}	V_{sd} [kN]	V_{rd} [kN]	V_{sd}/V_{rd}	Nº conectores	δ [cm]	δ/δ_{adm}
V9	101,25	171,75	59%	67,50	792,00	9%	7	1,41	83%
V10	131,85	171,75	77%	87,90	792,00	11%	7	1,69	99%

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 15 – Verificações para o caso 2

VIGA	Estado limite último							Estado limite de serviço	
	M_{sd} [kNm]	M_{rd} [kNm]	M_{sd}/M_{rd}	V_{sd} [kN]	V_{rd} [kN]	V_{sd}/V_{rd}	Nº conectores	δ [cm]	δ/δ_{adm}
V9	101,92	190,16	54%	67,95	1084,00	6%	7	1,67	97%
V10	133,49	247,93	54%	88,99	1498,00	6%	7	1,65	96%

(fonte: elaborado pelo autor)

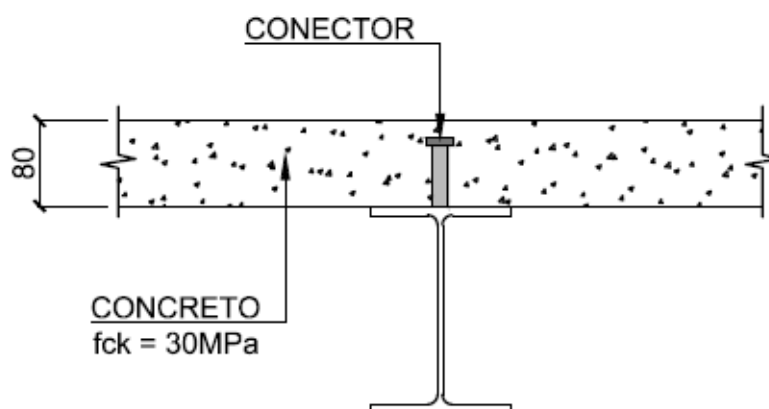
Conclui-se que as vigas estiveram de acordo com as exigências normativas, quando submetidas as duas situações propostas.

7.3.5 Vigas mistas com laje maciça de concreto

Em Bonine (2013), foi calculada a mesma laje da situação atual e teve-se como resposta uma espessura final de 8,0cm. Para o desenvolvimento deste item, se emprega a mesma espessura de laje. As verificações pertinentes às lajes, não serão abordadas, visto que, já foram calculadas no trabalho referenciado. Este método construtivo trabalha com escoramento, dispensando as verificações na etapa construtiva.

Este sistema é composto por perfil metálico, laje maciça de concreto e conectores de cisalhamento caracterizando a seção mista, conforme a figura 25.

Figura 25 – Seção transversal típica de vigas mistas com laje maciça (medida em milímetros)



(fonte: elaborado pelo autor)

7.3.5.1 Cargas do sistema construtivo

Os carregamentos foram baseados em apenas uma etapa, quadro 5, de maneira que a viga metálica suporte todos os esforços desde o início da obra. Os quadros 7 e 8 mostram os valores de cálculo das cargas atuantes

É possível observar, comparando caso 1 com caso 2, que as cargas nas vigas são exatamente as mesmas. Isso ocorre porque os perfis escolhidos para o caso 1, também atenderam o caso 2. Nos quadros 16 são explicitados os perfis escolhidos.

Quadro 16 – Definição dos perfis

Viga	Perfis utilizados	
	Caso 1	Caso 2
V9	W 310 x 21,0	W 310 x 21,0
V10	W 310 x 28,3	W 310 x 28,3

(fonte: elaborado pelo autor)

7.3.5.2 Verificações

Para o desenvolvimento deste item, foi criada uma planilha eletrônica que calcula e verifica todas as exigências da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 168).

Conforme apresentado no quadro 5, todas as cargas foram consideradas em apenas uma etapa, fazendo as devidas combinações para o estado limite último e o estado limite de serviço.

Conforme a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 168) as recomendações aplicáveis são:

- a) momento resistente, item O.2.3;
- b) resistência ao esforço cortante, item O.3;
- c) conectores de cisalhamento item O.4;
- c) deslocamento, item O.1.2.3.

No quadro 17, que apresenta os mesmos resultados tanto para o caso 1 como para o caso 2, foi verificado ELU e ELS para os dois casos. As interações foram feitas de maneira que a flecha se igualasse com a flecha admissível, estabelecido no item 6.2. Desta forma, acabou sendo o fator limitante do dimensionamento. A relação das solicitações com as resistências, não foram críticas. Para momento fletor a relação ficou em média 50% e para esforço cortante 12%.

Quadro 17 – Verificações para o caso 1 e 2

VIGA	Estado limite último							Estado limite de serviço	
	M_{sd} [kNm]	M_{rd} [kNm]	M_{sd}/M_{rd}	V_{sd} [kN]	V_{rd} [kN]	V_{sd}/V_{rd}	Nº conectores	δ [cm]	δ/δ_{adm}
V9	92,10	172,52	53%	61,40	512,00	12%	14	1,69	99%
V10	114,63	244,47	47%	76,42	687,00	11%	17	1,6	93%

(fonte: elaborado pelo autor)

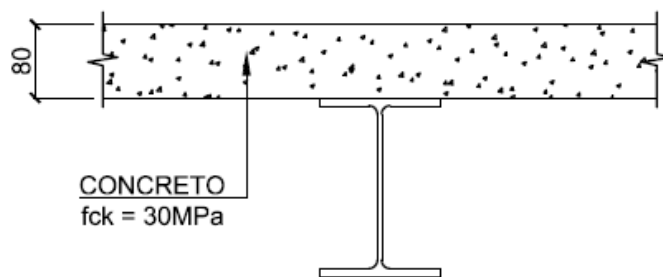
Conclui-se que as vigas estiveram de acordo com as exigências normativas, quando submetidas as duas situações propostas.

7.3.6 Vigas simples com laje maciça de concreto

Para este dimensionamento foi utilizado o mesmo modelo de laje maciça do item 7.3.5. A particularidade deste método é que não existe uma ligação entre a laje e o perfil de aço, caracterizando a interação nula. Contudo, serão adotados conectores com a função de travamento da laje no perfil.

A figura 26 mostra que os dois elementos não estão ligados, trabalhando separadamente.

Figura 26 – Seção transversal de viga simples com laje maciça (medida em milímetros)



(fonte: elaborado pelo autor)

7.3.6.1 Cargas do sistema construtivo

Os carregamentos foram baseados em apenas uma etapa, quadro 6, considerando o peso próprio da estrutura metálica, o peso do concreto fresco, cargas permanentes e as acidentais, referentes ao uso e ocupação. Os quadros 7 e 8 mostram os valores de cálculo das cargas atuantes. Estes valores são os mesmos adotados em 7.3.5.1, alterando apenas o PP do perfil adotado, conforme quadro 18.

Quadro 18 – Definição dos perfis

Viga	Perfis utilizados	
	Caso 1	Caso 2
V9	W 310 x 32,7	W 310 x 32,7
V10	W 360 x 32,9	W 310 x 38,7

(fonte: elaborado pelo autor)

7.3.4.3 Verificações

Para o desenvolvimento deste item, foi criada uma planilha eletrônica que calcula e verifica todas as exigências da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 47-51). Este item trata do dimensionamento de vigas que não são mistas. As recomendações aplicáveis são:

- a) momento fletor resistente, item 5.4.2;
- b) resistência ao esforço cortante, item 5.4.3;
- c) deslocamento, item C.3.

Nos quadros 19 e 20 foi verificado ELU e ELS para o caso 1 e o caso 2. A viga V9 obteve o mesmo dimensionamento para os dois casos, ou seja, mesmo reduzindo a altura máxima disponível, foi possível manter o perfil escolhido. Nota-se que a deformação também foi o ponto crítico do dimensionamento. Procurou-se trabalhar com a deformação sempre o mais próximo da deformação admissível, estabelecido no item 6.2. O momento resistente nas quatro análises, não foi otimizado em virtude da limitação do ELS, mantendo uma relação com a sollicitação (M_{sd}/M_{rs}) de 60%. O esforço cortante solicitante ficou bastante abaixo da sua capacidade resistiva, obtendo uma relação média (V_{sd}/V_{rs}) de 10%. Os conectores foram calculados para promover o travamento da laje com a viga evitando FLT (flambagem lateral com torção). Os mesmos ficaram afastados a uma distância menor ou igual ao comprimento L_p ($r_y \cdot \lambda_p$: raio de giração multiplicado pela esbeltez da seção), ou seja, antes da plastificação total da seção de aço, evitando a flambagem lateral do perfil. A viga V10 teve uma redução de conectores do caso 1 para o caso 2, devido a menor tendência de flambagem lateral do perfil escolhido.

Quadro 19 – Verificações para o caso 1

VIGA	Estado limite último						Estado limite de serviço		
	M_{sd} [kNm]	M_{rd} [kNm]	M_{sd}/M_{rd}	V_{sd} [kN]	V_{rd} [kN]	V_{sd}/V_{rd}	Nº conectores	δ [cm]	δ/δ_{adm}
V9	92,76	186,09	50%	61,84	792,00	8%	8	1,62	94%
V10	114,89	171,75	67%	76,59	792,00	10%	7	1,41	82%

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 20 – Verificações para o caso 2

VIGA	Estado limite último						Estado limite de serviço		
	M_{sd} [kNm]	M_{rd} [kNm]	M_{sd}/M_{rd}	V_{sd} [kN]	V_{rd} [kN]	V_{sd}/V_{rd}	Nº conectores	δ [cm]	δ/δ_{adm}
V9	92,76	186,09	50%	61,84	792,00	8%	8	1,62	94%
V10	115,22	193,01	60%	76,81	935,00	8%	5	1,38	80%

(fonte: elaborado pelo autor)

Conclui-se que as vigas estiveram de acordo com as exigências normativas, quando submetidas as duas situações propostas.

7.4 COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS

Este item objetiva fazer algumas comparações entre os métodos construtivos, relatados acima, para as vigas V9 e V10 no caso 1 (com altura livre) e também no caso 2 (altura máxima da viga + laje limitada em 40cm).

Os quadros 21 e 22 mostram os resultados referentes ao dimensionamento com altura livre (viga + laje).

Quadro 21 – Resultados viga V9 caso 1

VIGA 9						
Método construtivo	Perfil	M_{sd}/M_{rd} inicial	M_{sd}/M_{rd} final	δ/δ_{adm}	Consumo aço [kg]	Nº conectores
VM - SD	W 310 x 21,0	47%	45%	100%	126,0	14
VS - SD	W 360 x 32,9	-	59%	83%	197,4	5
VM - LM	W 310 x 21,0	-	53%	99%	126,0	14
VS - LM	W 310 x 32,7	-	50%	94%	196,2	6

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 22 – Resultados viga V10 caso 1

VIGA 10						
Método construtivo	Perfil	M_{sd}/M_{rd} inicial	M_{sd}/M_{rd} final	δ/δ_{adm}	Consumo aço [kg]	Nº conectores
VM - SD	W 310 x 32,7	51%	37%	96%	196,2	19
VS - SD	W 360 x 32,9	-	59%	99%	197,4	7
VM - LM	W 310 x 28,3	-	47%	93%	169,8	17
VS - LM	W 360 x 32,9	-	67%	82%	197,4	7

(fonte: elaborado pelo autor)

Os quadros 23 e 24, mostram os resultados para altura de viga fixada em 40cm (viga + laje), objetivando uma eventual restrição geométrica da edificação.

Quadro 23 – Resultados viga V9 caso 2

VIGA 9						
Método construtivo	Perfil	M _{sd} /M _{rd} inicial	M _{sd} /M _{rd} final	δ/δ_{adm}	Consumo aço [kg]	Nº conectores
VM - SD	W 250 x 32,7	33%	37%	88%	196,2	14
VS - SD	W 250 x 44,8	-	54%	97%	268,8	5
VM - LM	W 310 x 21,0	-	53%	99%	126,0	14
VS - LM	W 310 x 32,7	-	50%	94%	196,2	6

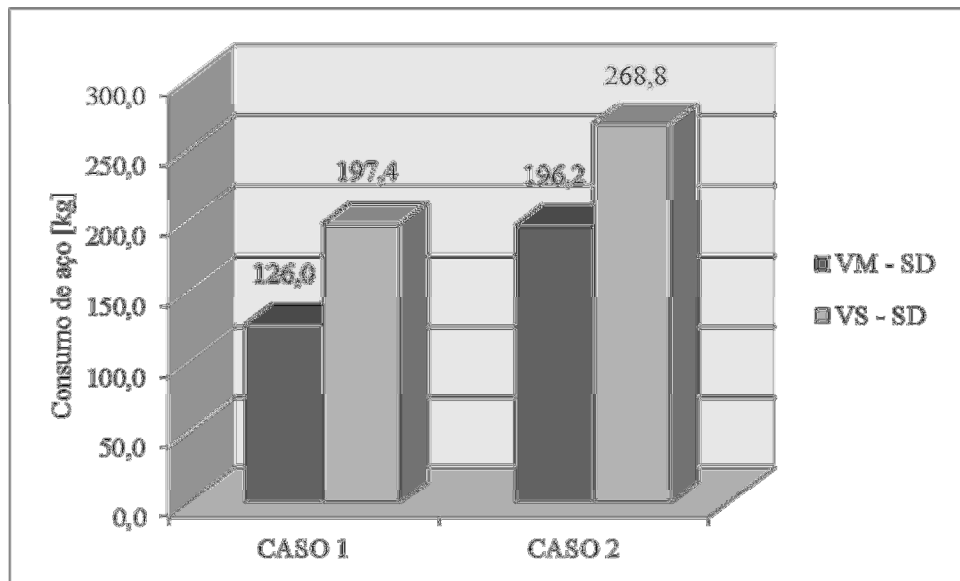
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 24 – Resultados viga V10 caso 2

VIGA 10						
Método construtivo	Perfil	M _{sd} /M _{rd} inicial	M _{sd} /M _{rd} final	δ/δ_{adm}	Consumo aço [kg]	Nº conectores
VM - SD	W 250 x 44,8	41%	30%	90%	268,8	26
VS - SD	W 250 x 62,0	-	54%	96%	372,0	7
VM - LM	W 310 x 28,3	-	47%	93%	169,8	17
VS - LM	W 310 x 38,7	-	60%	80%	232,2	5

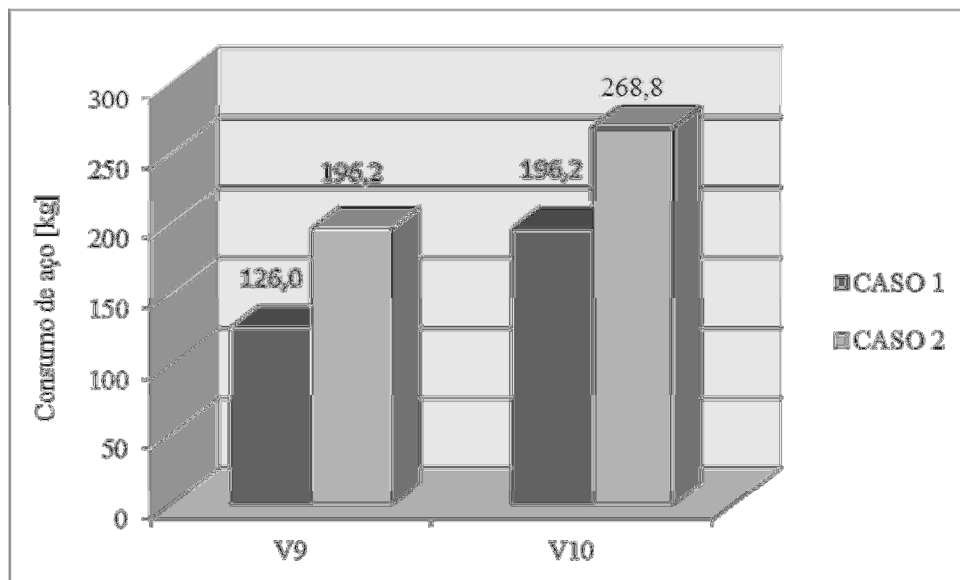
(fonte: elaborado pelo autor)

O caso 1, que tem como finalidade reduzir o consumo de aço, teve uma resposta muito significativa comparando-se a viga V9 no caso 1 e caso 2, entre os métodos VM-SD e VS-SD. Fixando a laje com fôrma de aço incorporada para a viga V9, foi possível ter uma economia de aço de 36% para o caso 1 e de 27% para o caso 2, conforme figura 27. Esta economia está associada uso de uma seção mista, ou seja, aço e concreto trabalhando em conjunto.

Figura 27 – Viga V9 com *steel deck*

(fonte: elaborado pelo autor)

A restrição geométrica sugerida, caso 2, pode ser alcançada, mas requer um acréscimo no consumo de aço de 55% na viga V9 e de 37% na viga V10, caso seja escolhido trabalhar com o método VM-SD, de acordo com a figura 28.

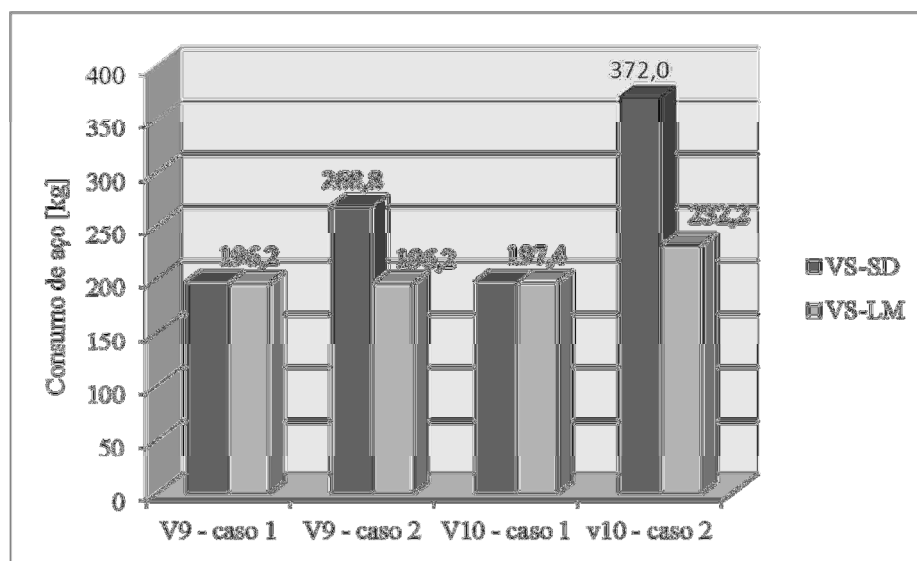
Figura 28 – Interação completa com *steel deck*

(fonte: elaborado pelo autor)

Os métodos VM-LM e VS-LM não apresentaram diferenças quando comparados nos casos 1 e 2, ou seja, o mesmo dimensionamento que atinge o menor consumo de aço, também cumpre os requisitos de altura máxima definida em 40cm.

É possível observar no caso 2 que a laje maciça de concreto apresentou maior economia no consumo de aço, tanto para viga V9 como para viga V10, quando estiverem trabalhando no sistema de vigas simples, ou seja, sem interação entre o aço e o concreto, conforme é mostrado na figura 29.

Figura 29 – Vigas com interação nula



(fonte: elaborado pelo autor)

No método VM-SD, comparando a relação momento fletor resistente (M_{sd}/M_{rs}) inicial com a final é possível perceber que na maioria dos casos esta relação apresentou decréscimo. Esta diferença é causada pela interação do aço e concreto, aumentando sua capacidade resistiva.

Para todos os casos, o ELS foi crítico. Caso fosse permitido utilizar contraflecha nas vigas, seria possível aproveitar mais a resistência da seção, reduzindo assim o consumo de aço utilizado.

7.5 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS COM NERVURAS PARALELAS À SEÇÃO DE AÇO

Como as vigas escolhidas para o estudo do pavimento tipo em análise apresentaram apenas nervuras, da laje *steel deck*, perpendiculares à seção de aço, este item irá mostrar uma situação hipotética de uma laje *steel deck* com nervuras paralelas à seção de aço. Esta disposição terá como objetivo analisar qual o ganho de resistência das vigas quando é considerada a área da nervura como região comprimida. Para realizar o dimensionamento das lajes com nervuras paralelas e perpendiculares à seção de aço, serão utilizados os mesmos dados de entrada do item VM-SD, ou seja, laje MF-75 com uma capa de concreto de 6,5cm formando uma laje de 14cm de altura e o concreto de preenchimento da laje com fôrma de aço incorporada será de $f_{ck} = 30\text{MPa}$.

7.5.1 Determinação das cargas

O dimensionamento é feito para vigas biapoiadas com vãos de 5m e 8m. Foram adotadas cargas usuais de projeto, conforme mostra o quadro 25:

Quadro 25 – Valores característicos das ações atuantes

Ação	Construção (1) [kN/m]	Final $t = \infty$ (2) [kN/m]
Permanente (g)	15,0	20,0
Variável (q)	1,5	5,0

(fonte: elaborado pelo autor)

As combinações das ações foram feitas para o estado limite último e o estado limite de serviço visando a situação mais desfavorável de cálculo.

Após as combinações das ações atuantes na etapa construtiva e na etapa final foram determinadas as cargas que serão utilizadas para o dimensionamento de VM-SD com nervuras perpendiculares e também paralelas ao perfil de aço.

Quadro 26 – Cargas atuantes

Cargas [kN/m]		
ELU		ELS
Construção	Final	Final
19,20	51,25	25,00

(fonte: elaborado pelo autor)

7.5.2 Resultados para o vão de 5m

Inicialmente foram verificados os perfis numa etapa construtiva, ou seja, se apenas a seção de aço suporta as cargas atuantes antes de o concreto atingir 75% do f_{ck} . É possível observar que tanto o momento fletor resistente quanto o esforço cortante resistente são superiores às solicitações de cálculo, conforme o quadro 27.

Quadro 27 – Verificação na etapa construtiva

NERVURA	PERFIL	CARGA [kN/m]	M_{sd} [kNm]	M_{rd} [kNm]	M_{sd}/M_{rd}	V_{sd} [kN]	V_{rd} [kN]	V_{sd}/V_{rd}
Perpendicular	W 250 x 17,9	19,20	60,00	66,18	91%	48,00	435,00	11%
Paralela	W 250 x 17,9	19,20	60,00	66,18	91%	48,00	435,00	11%

(fonte: elaborado pelo autor)

O quadro 28 mostra as verificações feitas na etapa final, ou seja, se a seção mista resiste às cargas finais permanentes que foi submetida à estrutura. No dimensionamento foi levado em conta apenas solicitações de momento e cortante, com o intuito precisar mais os resultados, de modo que o deslocamento possivelmente seria a verificação crítica. É possível observar que o momento resistente foi o mesmo tanto para nervuras perpendiculares quanto para nervuras paralelas à seção de aço. Isto ocorre quando a LNP localiza-se acima da nervura, com isso o equacionamento do momento resistente permanece o mesmo.

Quadro 28 – Verificação na etapa final

NERVURA	PERFIL	CARGA [kN/m]	M_{sd} [kNm]	M_{rd} [kNm]	M_{sd}/M_{rd}	V_{sd} [kN]	V_{rd} [kN]	V_{sd}/V_{rd}
Perpendicular	W 250 x 17,9	51,25	160,16	180,83	89%	128,13	435,00	29%
Paralela	W 250 x 17,9	51,25	160,16	180,83	89%	128,13	435,00	29%

(fonte: elaborado pelo autor)

Para se ter uma ideia dos deslocamentos quando se compara os dois sentidos de nervura, realizou-se o dimensionamento dos perfis e foi possível analisar que, quando a laje *steel deck* foi disposta com nervuras paralelas a seção de aço, esta apresentou uma redução de 6% no deslocamento devido à contribuição do concreto na região da nervura.

Quadro 29 – Análise dos deslocamentos

NERVURA	PERFIL	CARGA [kN/m]	δ [cm]	δ/δ_{adm}	Nº conectores
Perpendicular	W 310 x 32,7	51,25	1,36	95%	19
Paralela	W 310 x 32,7	51,25	1,27	89%	19

(fonte: elaborado pelo autor)

7.5.3 Resultados para o vão de 8m

O mesmo procedimento foi realizado para um vão de 8m com a intenção de avaliar os resultados para diferentes vãos. Nota-se que o perfil necessitou de uma seção maior em decorrência das solicitações terem aumentado. O perfil escolhido resiste as cargas na etapa construtiva de acordo com o quadro 30.

Quadro 30 – Verificação na etapa construtiva

NERVURA	PERFIL	CARGA [kN/m]	M_{sd} [kNm]	M_{rd} [kNm]	M_{sd}/M_{rd}	V_{sd} [kN]	V_{rd} [kN]	V_{sd}/V_{rd}
Perpendicular	W 310 x 38,7	19,20	153,60	193,01	80%	76,80	935,00	8%
Paralela	W 310 x 38,7	19,20	153,60	193,01	80%	76,80	935,00	8%

(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme o quadro 31, as duas disposições de nervuras apresentaram os mesmos resultados em função da LNP estar localizada acima do topo da nervura. Também são apresentados os resultados das cargas finais permanentes para os esforços de momento fletor e esforço cortante. O perfil escolhido mostrou resistência suficiente para as solicitações de cálculo.

Quadro 31 – Verificação na etapa final

NERVURA	PERFIL	CARGA [kN/m]	M_{sd} [kNm]	M_{rd} [kNm]	M_{sd}/M_{rd}	V_{sd} [kN]	V_{rd} [kN]	V_{sd}/V_{rd}
Perpendicular	W 310 x 38,7	51,25	410,00	426,49	96%	205,00	935,00	22%
Paralela	W 310 x 38,7	51,25	410,00	426,49	96%	205,00	935,00	22%

(fonte: elaborado pelo autor)

Para o vão de 8m também foi dimensionado um perfil que resistisse o deslocamento sofrido pela combinação de cargas da etapa final. Assim como no caso anterior, a combinação das nervuras da laje paralelas à seção de aço apresentou maior resistência ao deslocamento, porém neste caso foi possível ainda reduzir o consumo de aço em função da contribuição do concreto na região da nervura.

Quadro 32 – Análise dos deslocamentos

NERVURA	PERFIL	CARGA [kN/m]	δ [cm]	δ/δ_{adm}	Nº conectores
Perpendicular	W 460 x 68,0	51,25	2,17	95%	34
Paralela	W 460 x 60,0	51,25	2,27	99%	35

(fonte: elaborado pelo autor)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho buscou mostrar as diferenças no dimensionamento e resultados de vigas mistas quando comparadas com vigas simples, sem interação entre o aço e o concreto, utilizando dois tipos de sistemas construtivos. Estas configurações foram submetidas a dois casos com a intenção de melhorar a interpretação dos resultados.

Foi possível analisar que em todos os métodos construtivos, VM-SD, VS-SD, VM-LM e VS-LM, em que as vigas foram submetidas, ocorreu aprovação dos perfis no que diz respeito a critério de ELU e ELS. Como a escolha de uma solução não depende apenas destas verificações, mas também questões que envolvem custo, item não abordado neste trabalho, torna-se difícil a indicação de qual o melhor método construtivo a ser utilizado. Entretanto, a solução VM-SD apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito a consumo de aço, de acordo com as comparações feitas, e também possui uma característica de agilidade e velocidade de execução no canteiro de obras. Este mesmo método construtivo foi o que mostrou a menor relação de momentos (M_{sd}/M_{rs}), indicando maior resistência da seção.

A condição de restrição geométrica da estrutura em 40,0cm (caso 2) foi atendida com sucesso, porém teve um aumento no consumo de aço de 55% na V9 e 37% na V10, ou seja, para uma situação real de projeto o custo da obra torna-se um ponto crítico.

Como o ELS foi determinante para o dimensionamento das vigas mistas e vigas simples em todos os casos, a utilização de contraflechas nos perfis metálicos possivelmente traria benefícios ao dimensionamento, de maneira que a relação de momentos (M_{sd}/M_{rs}) fosse melhor trabalhada, ou seja, subindo para um patamar próximo de 100% e aproveitando mais as propriedades da seção. Os motivos por não se adotar este procedimento foi o de avaliar o comportamento da relação M_{sd}/M_{rs} dentro de uma faixa de deslocamento e também a incerteza da qualidade de execução de contraflecha em perfis metálicos, no momento de fabricação da peça.

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. Disponível em: < http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/pdf/cee25_51>. Acesso em: 10 nov. 2014.
- ANDRADE, P. A. Entrevista perfil histórico. **Revista Construção**, São Paulo, n. 2719, 2000. Disponível em: < <https://br.groups.yahoo.com/neo/groups/HOM/conversations/topics/2397>>. Acesso em: 11 nov. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. **Edifícios de Múltiplos Andares em Aço**. São Paulo: Pini, 2004.
- BONINI, S. N. **Lajes mistas steel deck**: estudo comparativo com lajes maciças de concreto armado quanto ao dimensionamento estrutural. 2012. 109f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- CISER. Parafusos e porcas Stud bolts, [2001]. <<http://www.ciser.com.br/htcms/media/pdf/destaques/br/folheto-stud-bolts>> Acesso em 17 nov. 2014.
- COBRAPI. Edifícios de pequeno porte estruturados em aço. **Bibliografia técnica para desenvolvimento da construção em aço**, Belo Horizonte, v. 4, 1987 (reimpr. 2003). Disponível em: < <http://www.skylightestruturas.com.br/downloads/edificios.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2015.
- COELHO, R. A. **Interface entre perfis estruturais laminados e sistemas complementares**. 4.ed. [São Paulo]: Gerdau, 2007. Coletânea do uso do aço. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalhe-produto.aspx?familia=319>>². Acesso em: 20 maio 2015.
- DIAS, L. A.de M. **Estruturas de Aço**: conceitos, técnicas e linguagem. São Paulo: Zigurate, 1997.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço**: dimensionamento prático. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009 (reimpr. 2011).

² Estando no site < <http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalhe-produto.aspx?familia=319>>, seleciona a aba "Catálogos e manuais", e localize na lista dos documentos o <Manual Interface entre Perfil Estruturais laminados e Sistemas complementares.zip>:selecione para fazer o *download* do documento.

PINTO, F. M. P. M. **Larguras efetivas em vigas mistas submetidas a diferentes tipos de carregamento**. 2009.78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

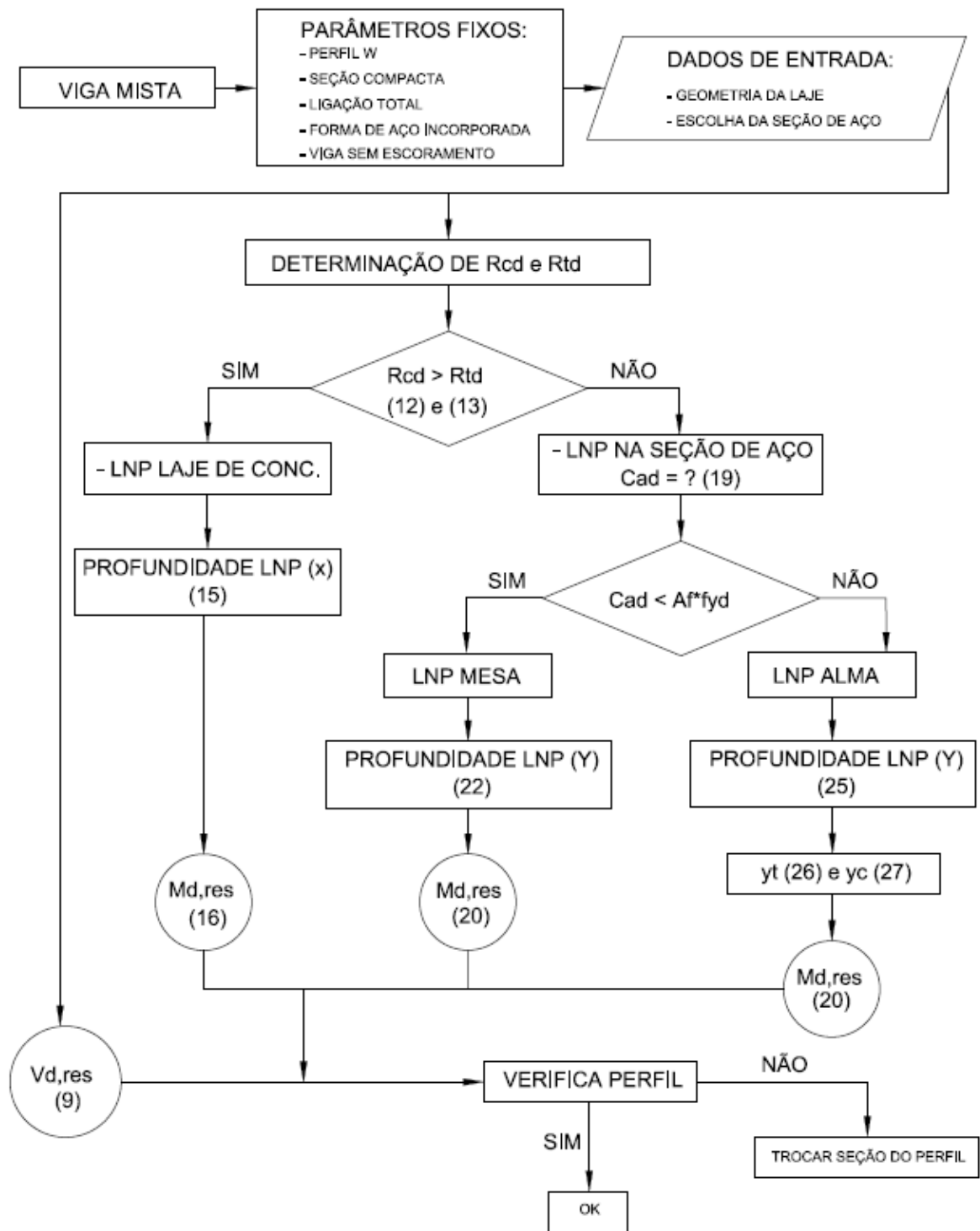
QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MARTINS, A. G. **Estruturas Mistas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012a. v. 1. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br>>. Acesso em 18 nov. 2014.

_____. **Estruturas Mistas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012b. v. 2. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br>>. Acesso em 25 set. 2014.

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

APÊNDICE A - Fluxograma do momento resistente

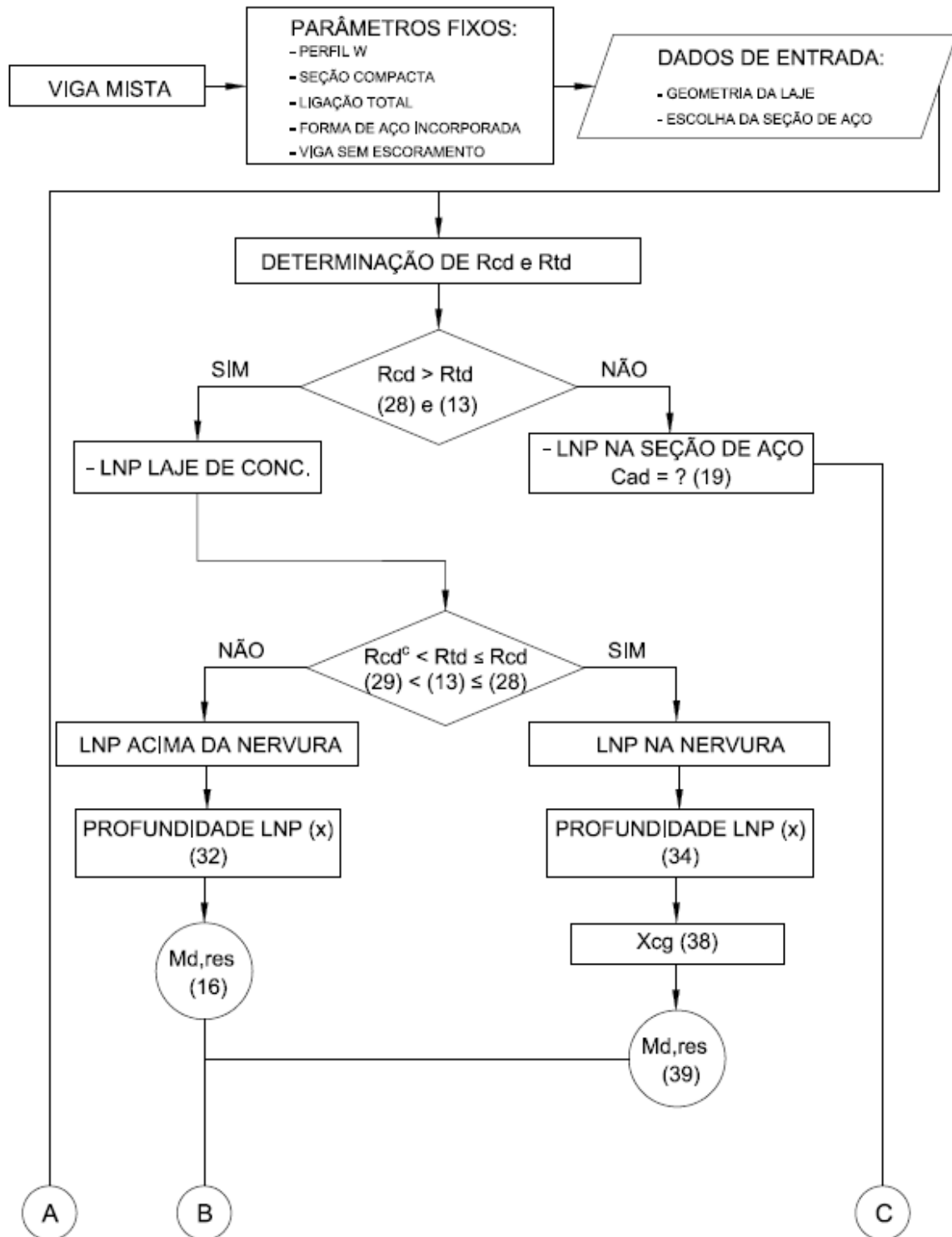
Figura AP-A1 – Fluxograma para determinação do momento resistente com nervuras perpendiculares à seção de aço

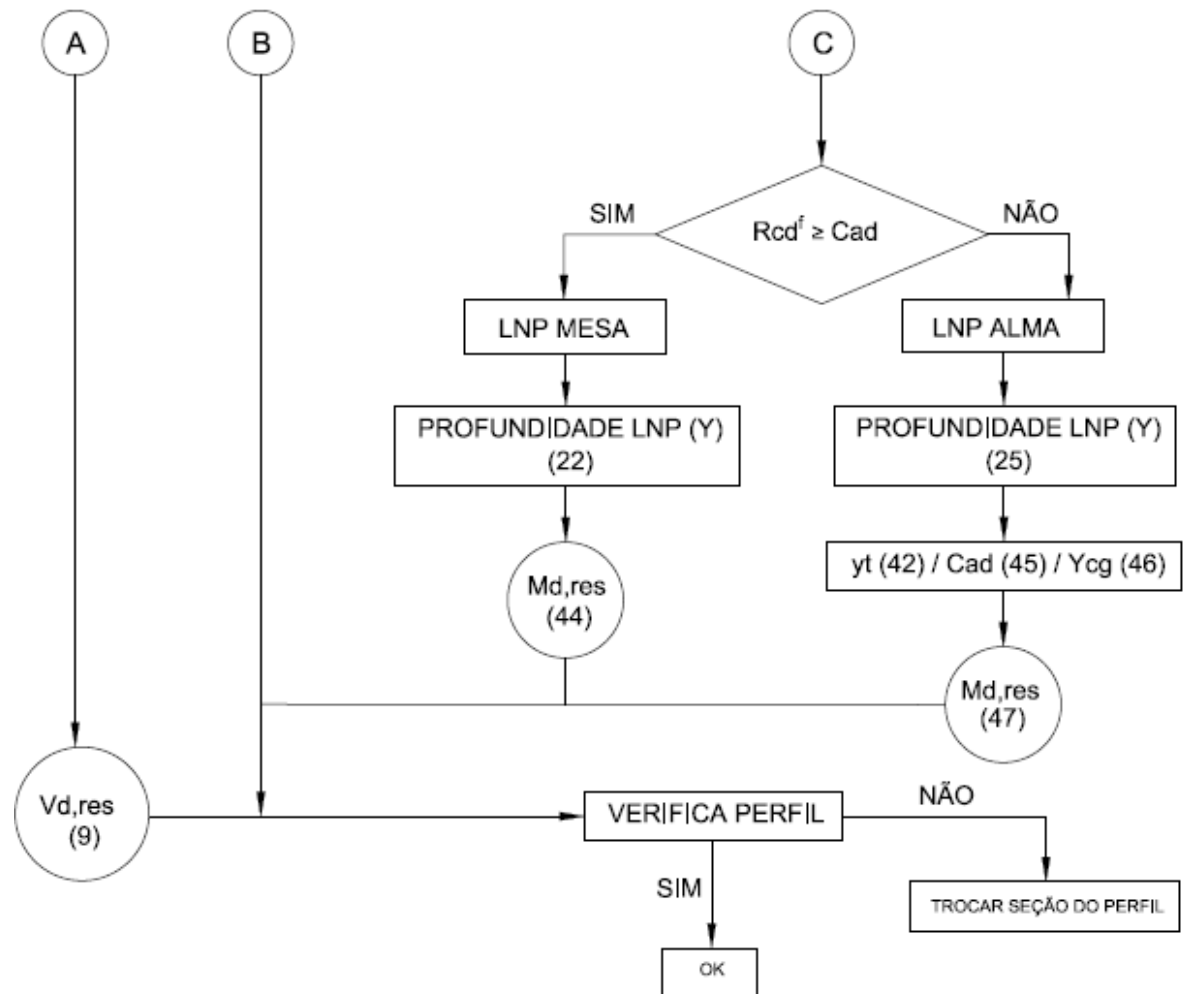


(fonte: elaborado pelo autor)

Para cada passo do fluxograma foi indicado, entre parênteses, o número da equação envolvida.

Figura AP-A2 – Fluxograma para determinação do momento resistente com nervuras paralelas à seção de aço





(fonte: elaborado pelo autor)

Para cada passo do fluxograma foi indicado, entre parênteses, o número da equação envolvida.