



FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL

GABRIELA DE PAULA COUTINHO
RA: 20909341

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL EM FUNÇÃO DA CONTINUIDADE
DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO**

BRASÍLIA
2013

FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL

GABRIELA DE PAULA COUTINHO
RA: 20909341

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL EM FUNÇÃO DA CONTINUIDADE
DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO**

Trabalho de Curso (TCC)
apresentado como um dos requisitos
para a conclusão do curso de
Engenharia Civil do UniCEUB -
Centro Universitário de Brasília

Orientador: William Oliveira Bessa

BRASÍLIA
2013

GABRIELA DE PAULA COUTINHO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL EM FUNÇÃO DA CONTINUIDADE
DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO**

Trabalho de Curso (TCC)
apresentado como um dos requisitos
para a conclusão do curso de
Engenharia Civil do UniCEUB -
Centro Universitário de Brasília

Orientador: William Oliveira Bessa

Brasília, 02 de Dezembro de 2013

Banca Examinadora

Eng.º Civil: William Oliveira Bessa, D.Sc
Orientador

Eng.º Civil: João da Costa Pantoja, D.Sc
Examinador Interno

Eng.º Civil: Marcio Augusto Roma Buzar, D.Sc
Examinador Externo, Universidade de Brasília (UNB)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, William Oliveira Bessa, pelo conhecimento, confiança e incentivo desde o começo do projeto de iniciação científica.

Aos meus professores pelos ensinamentos e apoio.

Aos meus colegas de curso e amigos pelo companheirismo.

À minha irmã e meu cunhado, Tatiana e Ronnie, e à todos meus familiares, por sempre acreditarem e por todo amor a mim dedicado.

Ao meu namorado, Henrique, pela eterna paciência, enorme apoio, dedicação, confiança e carinho.

Aos meus pais, Vilmar e Tânia, por todas as oportunidades que me deram, pelo o apoio e incentivo e por muito amor.

RESUMO

Os sistemas construtivos mistos aço-concreto são empregados em larga escala nos Estados Unidos, Europa e Ásia. No Brasil, observa-se nas últimas décadas um crescimento no emprego de tal sistema construtivo, principalmente em projetos de edifícios de múltiplos andares. Dentro deste contexto, as vigas mistas aço-concreto surgiram com a percepção da contribuição da laje de concreto sobre a viga de aço, nas verificações de projeto. Esses materiais quando conectados de forma apropriada atuam na estrutura como um só elemento, somando suas principais vantagens. Este trabalho objetivou o estudo de aspectos qualitativos e quantitativos de vigas mistas aço concreto, considerando critérios de pré-dimensionamento dos elementos estruturais (vigas e lajes), constituintes de um sistema estrutural em pórtico. Inicialmente foram abordadas as características teóricas do elemento misto, apresentando o grau de interação tanto parcial quanto total, garantido através dos conectores de cisalhamento, adotando os aspectos e recomendações normativas. Ao final foi apresentado um estudo de caso com diferentes situações onde a teoria é aplicada na prática corrente da engenharia estrutural. Para o desenvolvimento do trabalho fez-se necessário a utilização do programa computacional "FTool" para a análise dos diagramas de esforços e reações de apoio. Esta pesquisa apresenta ao leitor um conhecimento dos principais aspectos teóricos e normativos para o dimensionamento de uma viga mista simplesmente apoiada ou contínua, o cálculo da sua resistência e sua influência no comportamento estrutural. A análise apresentada contribui para a otimização de projetos estruturais.

Palavras-chave: Vigas mistas aço-concreto, conectores de cisalhamento, vigas mistas biapoiadas, vigas mistas contínuas, pórticos.

ABSTRACT

Composite construction systems of steel and concrete are applied in large scale in the United States, Europe and Asia. A growth in the application of this constructive method in Brazil is noticeable, mainly in projects of multi-story buildings. Within this context, composite beams of steel and concrete appeared with the perception of a portion of the slab that can contribute to the capability of the steel beam, in design verifications. These materials, when connected appropriately, act on the structure as one element, adding the main qualities of each. The objective of this study is to analyze the efficiency of a composite beam within a gantry structure. Initially the theoretical characteristics of a composite system were considered, showing the level of interaction of the two materials, both partial and total, which is assured due to shear connectors. A case study is presented, in which the theoretic and standard aspects were applied in a practical example of structural engineering with different situations, was presented at the end. For the development of this study the use of a computer program "Ftool" was necessary for the analysis of the strength diagram and support reactions. This study presents a knowledge of the main theoretical and normative aspects for the dimensioning of a simply supported or continuous composite beam, the calculus of the resistance and the influence on the whole structural behavior. The presented analysis contributes to the optimization of structural projects.

Keywords: Composite beams steel-concrete, shear connectors, simply supported composite beams, continuous composite beams, gantry structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de aço com laje de concreto com fôrma de aço incorporada. Fonte: Arquivo pessoal.....	12
Figura 2 - Principais tipos de vigas mistas. Fonte: FABRIZZI, 2007	17
Figura 3 - Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas. Fonte: ALVA, 2000	18
Figura 4 - Distribuição das tensões de cisalhamento considerando o efeito “shear-lag”. Fonte: ALVA, 2000.....	20
Figura 5 - Principais tipos de conectores de cisalhamento. Fonte: FIGUEIREDO, 2004.....	22
Figura 6 - Comportamento dos conectores rígidos e flexíveis. Fonte: MALITE, 1993.....	23
Figura 7 - Comportamento dos conectores ao longo da viga mista. Fonte: FABRIZZI, 2007	23
Figura 8 - Vigas mistas biapoiadas. Fonte: DAVID, 2009	25
Figura 9 - Vigas mistas contínuas. Fonte: DAVID, 2009	26
Figura 10 - Laje mista aço-concreto tipo “steel deck”. Fonte: www.codeme.com.br	27
Figura 11 - Planta baixa do edifício comercial. Fonte: Ftool.....	30
Figura 12 - Pórtico do edifício exemplo com vigas simplesmente apoiadas	32
Figura 13 - Pórtico do edifício exemplo com vigas contínuas.....	33
Figura 14 – Seção transversal – viga mista + laje maciça.....	34
Figura 15 – Seção transversal – viga mista + laje mista	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ações permanentes no edifício exemplo.....	31
Tabela 2 - Momentos fletores da viga mista biapoiada exemplo.....	38
Tabela 3 - Momentos de inércia da seção homogeneizada	43
Tabela 4 - Momentos fletores da viga mista contínua exemplo.....	47
Tabela 5 - Momentos fletores da viga mista biapoiada exemplo.....	54
Tabela 6 - Momentos de inércia da seção homogeneizada	58
Tabela 7 - Momentos fletores da viga mista contínua exemplo.....	63
Tabela 8 - Comparação de momentos máximos resistentes para o perfil W 310 x 38,7 – vigas biapoiadas.....	65
Tabela 9 - Comparação do peso dos perfis	66
Tabela 10 - Comparação do peso dos perfis.....	66
Tabela 11 - Comparação dos momentos resistentes para vigas mistas biapoiadas com laje maciça e com laje mista.....	67
Tabela 12 - Comparação dos momentos resistentes para vigas mistas contínuas com laje maciça e com laje mista.....	67
Tabela 13 - Resistência dos conectores	68
Tabela 14 - Número de conectores	68

Lista de Abreviaturas e Símbolos

- A - Área da seção transversal do perfil de aço
- A_c - Área da mesa de concreto
- A_s - Área da armadura
- A_{cs} - Área da seção transversal do conector
- A_w - Área da alma do perfil de aço
- b_{ef} - Largura efetiva da mesa de concreto
- b_f - Largura da mesa do perfil de aço
- b_F - Largura da nervura da fôrma de aço
- C - Resultante de compressão na laje
- C_{ad} - Resultante de compressão no perfil de aço
- d - Altura total do perfil de aço
- d_{cs} - Diâmetro do corpo do conector tipo pino com cabeça
- D_{cs} - Diâmetro da cabeça do conector tipo pino com cabeça
- E - Módulo de elasticidade do aço
- E_c - Módulo de elasticidade longitudinal do concreto
- f_{ck} - Resistência característica do concreto à compressão
- f_{cd} - Tensão de compressão de cálculo no concreto
- f_{sy} - Tensão de escoamento da armadura
- f_y - Tensão de escoamento do aço do perfil
- f_{ucs} - Resistência à ruptura do aço do conector
- f_{yF} - Tensão de escoamento do aço da fôrma de aço incorporada
- g_a - Coeficiente de ponderação da resistência do aço do perfil
- g_c - Coeficiente de ponderação da resistência do concreto
- g_{cs} - Coeficiente de ponderação da resistência do conector
- g_f - Coeficiente de ponderação do esforço solicitante
- g_s - Coeficiente de ponderação da resistência do aço da armadura
- H - Altura livre da alma de perfis I e H
- h_{cs} - Altura total do conector de cisalhamento
- h_F - Altura nominal da nervura da laje com fôrma de aço incorporada
- LNP - Linha neutra plástica
- $M_{rd,pl}$ - Momento fletor resistente plástico de cálculo
- M_{sd} - Momento fletor máximo solicitante de cálculo

n_{cs} - Número de conectores de cisalhamento

$N_{rd,pl}$ - Resistência plástica da seção transversal a carregamentos axiais

Q_{rd} - Resistência do conector de cisalhamento

σ - Tensão

T_{ad} - Resultante de tração no perfil de aço ou na armadura

t_c - Espessura da laje de concreto

t_f - Espessura da mesa do perfil de aço

t_F - Espessura da fôrma de aço

t_w - Espessura da alma do perfil de aço

V_h - Força de cisalhamento longitudinal atuante na conexão

V_{hd} - Força de cisalhamento longitudinal atuante de cálculo na conexão

y_c - Altura comprimida do perfil de aço

y_t - Altura tracionada do perfil de aço

Z_{pl} - Módulo de resistência plástica

SUMÁRIO

1	Introdução.....	12
	1.1 Objetivo.....	13
2	Revisão Bibliográfica	15
	2.1 Considerações iniciais	15
	2.2 Vigas mistas aço-concreto	15
	2.2.1 Comportamento estrutural.....	17
	2.2.2 Largura efetiva	19
	2.2.3 Conectores de cisalhamento.....	21
	2.2.4 Vigas mistas biapoiadas.....	25
	2.2.5 Vigas mistas contínuas e semi-contínuas	25
	2.2.6 Vigas mistas com laje steel-deck	26
	2.2.7 Resistência ao momento fletor.....	27
	2.2.8 Resistência à força cortante.....	29
3	Pré-dimensionamento – Estudo de Caso	30
	3.1. Exemplo 1: laje maciça.....	30
	3.1.1. Viga mista biapoiada.....	34
	3.1.2. Viga mista continua.....	39
	3.2. Exemplo 2: laje mista	47
	3.2.1. Viga mista biapoiada.....	47
	3.2.1. Viga mista continua.....	53
4	Análise dos resultados	62
5	Conclusões.....	67
6	Referências Bibliográficas	69

1. Introdução

Tanto no contexto mundial como no Brasil, os sistemas estruturais mistos têm sido largamente utilizados na construção civil. Desde a publicação da norma ABNT NBR – 8800 “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”, em 2008, elementos mistos passaram a ser contemplados pela norma brasileira e hoje, a grande maioria dos edifícios de múltiplos andares vem sendo projetados com elementos mistos.

A determinação de um sistema misto aço-concreto é alcançado quando o perfil de aço trabalha em conjunto com o concreto. Exemplos destes sistemas são as lajes de concreto com forma de aço incorporada, pilares mistos constituídos por um perfil de aço envolvido por concreto ou por um tubo de aço preenchido com concreto e as vigas mistas.

Figura 1 - Estrutura de aço com laje de concreto com fôrma de aço incorporada.



Fonte: Arquivo pessoal

As vigas mistas aço-concreto surgiram como consequência da utilização de vigas de aço sob lajes de concreto. Inicialmente a viga era projetada de forma a

suportar o peso da laje de concreto sobre ela apoiada. Posteriormente a contribuição da laje passou a ser considerada, caracterizando um sistema misto.

No referente à ação de cargas gravitacionais, esse sistema constitui um melhor aproveitamento das características dos materiais, resultando em redução no peso do perfil metálico, e da estrutura como um todo. Economia, acréscimo de resistência e rigidez, e uma maior rapidez na montagem são os principais motivos que levam à utilização de sistemas mistos. As vigas mistas, em específico, são muito utilizadas, pois apresentam resistência maior que vigas puramente de aço.

Para que esse elemento se comporte como viga mista utiliza-se os elementos metálicos denominados conectores de cisalhamento, os quais visam restringir o escorregamento longitudinal e a separação vertical na interface aço-concreto, garantindo a existência de interação entre a laje de concreto e a viga de aço.

No dimensionamento de vigas mistas submetidas à flexão existem dois conceitos que devem ser conhecidos. O primeiro é o grau de conexão e o outro o grau de interação. O grau de conexão depende da resistência dos elementos em uma viga mista: o perfil de aço, a laje de concreto e o conector.

O somatório da resistência individual de cada conector tem que contribuir para a máxima força longitudinal. Quanto ao grau de interação existem duas situações conhecidas: a interação total ou completa, onde não há escorregamento longitudinal relativo, e a interação parcial quando o escorregamento relativo causa uma descontinuidade no diagrama de deformações. A utilização da estrutura e o método construtivo também influenciam no dimensionamento.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar os procedimentos teóricos e normativos de dimensionamento das vigas mistas aço-concreto no cálculo de sua resistência, considerando as seguintes condições:

- interação parcial da ligação aço-concreto em vigas mistas biapoiadas (somente momento positivo) e contínuas (momento positivo e negativo).
- interação total da ligação aço-concreto em vigas mistas biapoiadas (somente momento positivo) e contínuas (momento positivo e negativo).

Os procedimentos serão baseados na norma brasileira NBR 8800/2008.

Pretende-se abranger aspectos relativos ao projeto de vigas mistas aço-concreto, apresentando uma análise crítica com a ênfase sempre voltada para a

otimização das considerações de projeto, englobando todos os aspectos teóricos envolvidos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações iniciais

A escolha de um melhor sistema estrutural depende de vários fatores tais como:

- utilização da edificação,
- projeto arquitetônico,
- ações atuantes,
- método construtivo,
- mão de obra e tecnologia disponíveis, prazo e custo da obra e o retorno do capital investido.

A combinação de elementos de aço e concreto também deve ser bastante estudada. As características dos dois materiais são diferentes e complementares. O concreto apresenta alta resistência à compressão, elevada rigidez e proteção contra corrosão e incêndio, já o aço complementa essas características com elevada resistência à tração e esbeltez.

As lajes e vigas fazem parte do subsistema de uma estrutura que resiste às ações verticais (gravitacionais) e, além disso, participam na distribuição dos esforços horizontais (FABRIZZI, 2007). Os vão das vigas influenciam diretamente na escolha do tipo de viga a ser utilizado, e no caso de vigas mistas, as mais econômicas são compostas por vigas isostáticas. Vigas mistas biapoiadas tem a mesa de concreto sempre comprimida, a mesa do perfil de aço quando comprimida é travada lateralmente pela laje e o restante do perfil está tracionado.

Em vigas biengastadas ou contínuas a mesa inferior do perfil de aço é submetida à compressão, havendo a necessidade de enrijecê-la para impedir sua flambagem local e então perdendo sua economia. Por isso muitos projetistas preferem utilizar vigas isostáticas e aplicar um contraventamento para resistir aos esforços horizontais.

2.2. Vigas mistas aço-concreto

A viga de aço pode ser de diferentes perfis, como: tipo “I”, caixão, tubular retangular ou treliça, sendo a mais comum o perfil “I”. A laje de concreto pode ser moldada “in loco”, pré-moldada ou ser uma laje mista, também conhecida como “steel-deck”, que possui uma fôrma de aço incorporada. As vigas mistas, então, são

a combinação do perfil de aço, simétrico em relação ao plano de flexão, sobreposto por uma laje acima da sua face superior, havendo uma ligação mecânica entre os componentes.

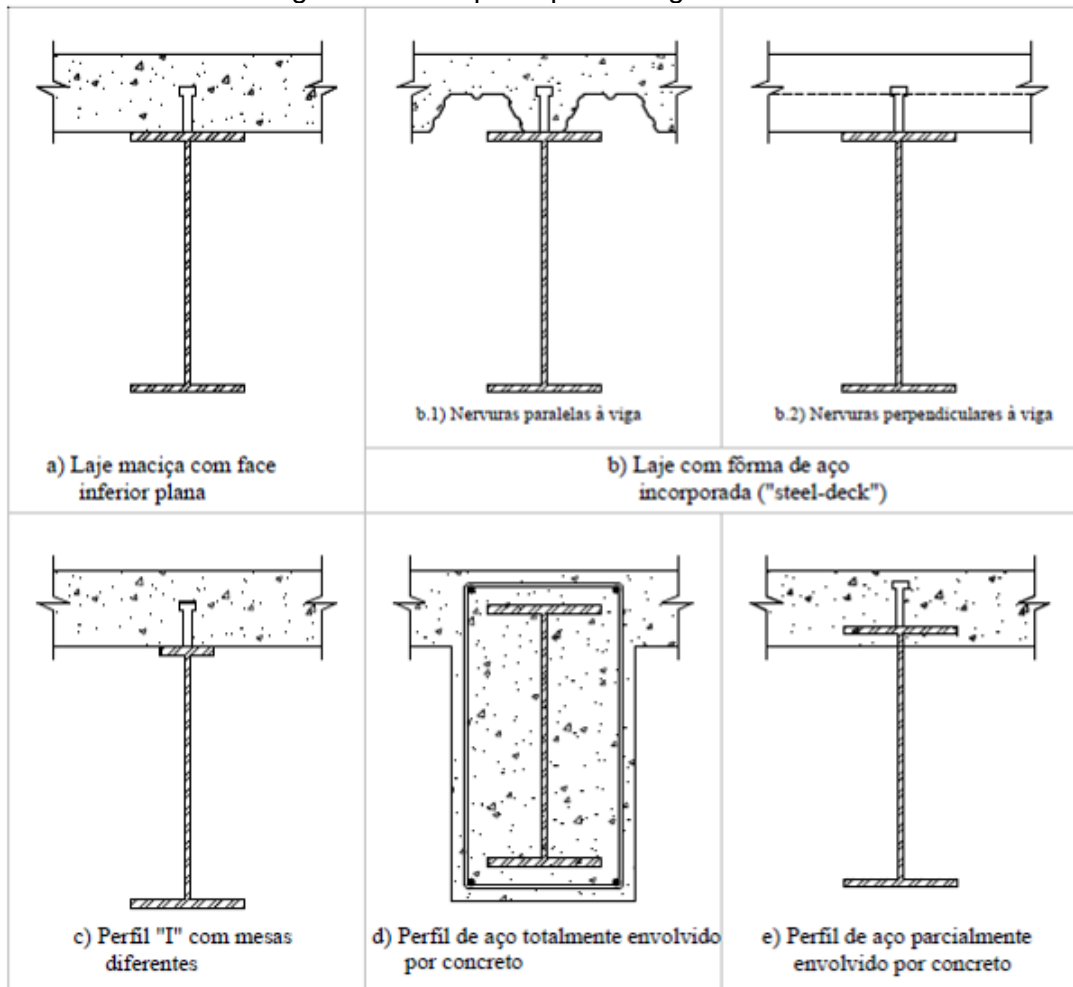
Os dois elementos principais de uma viga mista já estão presentes na maioria dos edifícios de múltiplos andares: o perfil de aço e a laje de concreto ou laje mista tipo “steel-deck”. O que garante a ligação mecânica entre os dois elementos é o conector de cisalhamento, que também existem vários tipos.

Os tipos de lajes já são muitos e sempre há o surgimento de outros em buscas de novas tecnologias para a construção civil, mas de uma maneira geral é possível a interação entre a viga de aço e a laje. Os principais tipos de laje vistos em vigas mistas atuais são (FABRIZZI, 2007):

- lajes de concreto maciça onde os conectores são soldados à mesa superior do perfil e incorporados à laje;
- lajes mistas (“steel-deck”) moldadas ‘in-loco’ com fôrma de aço incorporada onde o conector é chumbado através da fôrma de aço à mesa do perfil;
- laje pré-fabricada: laje contendo elementos pré-fabricados e moldados ‘in loco’.

Existem inúmeras maneiras de compor uma viga mista, sendo as principais formas apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Principais tipos de vigas mistas.



Fonte: FABRIZZI, 2007.

De forma geral, podemos dizer que o dimensionamento de uma viga mista depende de uma série de parâmetros, dentre os quais alguns são estabelecidos segundo a necessidade e conveniência do projeto.

Entre os parâmetros que devem ser estabelecidos, além das dimensões dos elementos que compõe a seção transversal, estão o tipo de interação aço-concreto e o método construtivo a ser empregado.

2.2.1. Comportamento estrutural

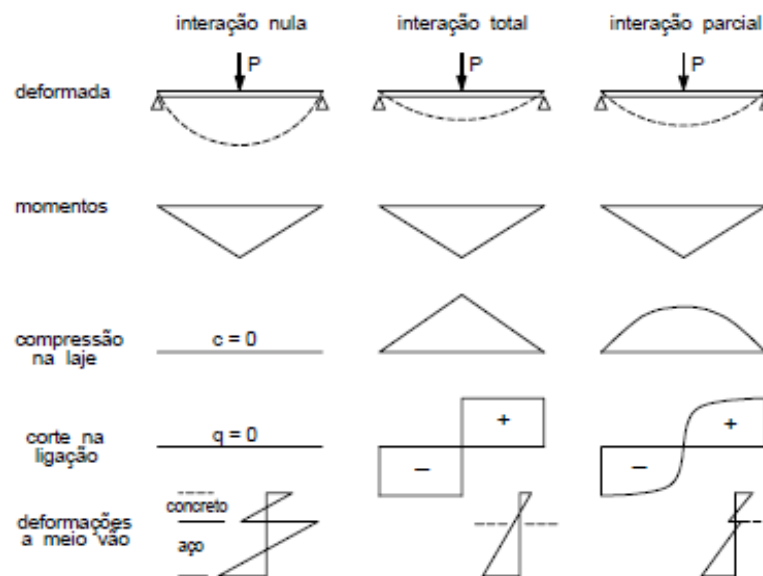
Uma vantagem de vigas mistas em oposição às vigas de aço isoladas é que a flambagem local da mesa e da alma, assim como a flambagem lateral por torção, são impedidas ou amenizadas, os dois elementos quando solicitados à flexão trabalham isoladamente à flexão. No caso de vigas mistas submetidas à flexão,

depende do nível da ligação aço-concreto, e são conhecidas duas situações: interação total ou completa e a interação parcial.

A interação completa denomina uma “ligação perfeita”. A tensão cisalhante é pequena e só provoca deformações mínimas nos conectores de cisalhamento mais solicitados, que não promove um escorregamento longitudinal relativo. A flexão gerada nesse caso ocorre em torno do eixo que passa pelo centroide da seção mista, verificando-se a existência de uma única linha neutra.

O fluxo de cisalhamento longitudinal aumenta à medida que a carga na estrutura também aumenta, causando cada vez mais o escorregamento relativo. As deformações causadas nos conectores são mais significativas afetando a distribuição das tensões chegando à plastificação e, conseqüentemente, à deformabilidade da viga. A descontinuidade no diagrama de deformações e a presença de duas linhas neutras, uma no aço e outra no concreto, caracterizam a interação parcial. A Figura 3 ilustra as diferenças de acordo com o grau de interação.

Figura 3 - Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas.



Fonte: ALVA, 2000.

Uma forma simplificada de explicar o grau de interação é dizer que, se os conectores situados na região de momento positivo tiverem resistência de cálculo maior ou igual à menor resistência de cálculo entre o componente de aço ou a laje de concreto, será uma interação completa, caso contrário será uma interação parcial.

O método construtivo também influencia no comportamento estrutural da viga mista. A construção pode ser escorada ou não escorada. Nas construções escoradas a viga de aço só é solicitada quando retira o escoramento após a cura do concreto.

Neste caso são analisadas as forças solicitantes na estrutura antes e após a cura do concreto. Quando não há escoramento a viga de aço é isoladamente solicitada tendo que suportar o peso do concreto fresco e o peso próprio do perfil de aço, ou seja, a viga de aço deve ter resistência adequada. Tanto em construções escoradas ou não escoradas o momento fletor resistente do sistema misto é o mesmo.

2.2.2. Largura efetiva

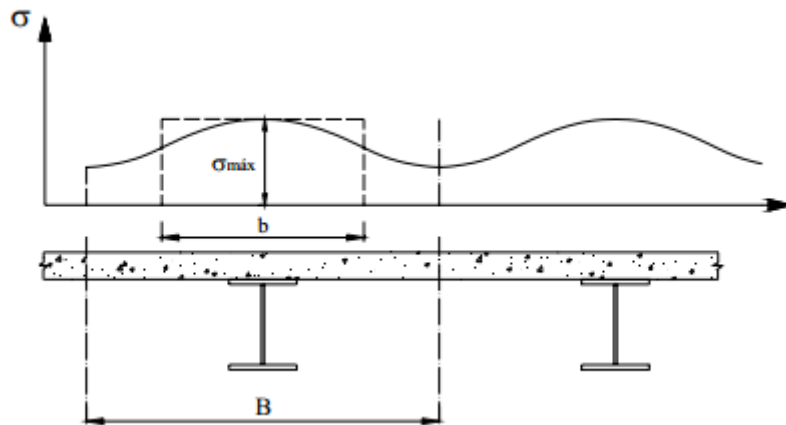
A determinação da largura efetiva é o passo inicial do dimensionamento de vigas mistas. Quando a largura é muito grande, a partir de certa distância do eixo da alma da viga, trechos da mesa não trabalham inteiramente ao momento fletor, assim, a viga é menos rígida que o indicado pela teoria elementar da flexão. Por isso, utiliza-se então, uma largura fictícia reduzida onde a tensão pode ser considerada uniforme.

Os estudos da largura efetiva começaram nos anos 60 do século passado através da análise de placas apoiadas sobre vigas e os conceitos foram aplicados para as vigas mistas. Nesta época, também foram desenvolvidas soluções analíticas para o cálculo de vigas mistas simplesmente apoiadas variando alguns parâmetros geométricos. Anos depois, os estudos estenderam-se utilizando a modelagem numérica como ferramenta para a análise de vigas em regime elástico.

A teoria elementar da flexão em vigas supõe que a variação transversal das tensões longitudinais na laje de concreto tem distribuição uniforme, mas isso não ocorre porque as tensões de cisalhamento presentes na laje não permitem que as seções planas permaneçam planas.

Essa deformabilidade da laje é o efeito conhecido como “shear-lag”. Na Figura 4 pode-se observar o fenômeno “shear-lag” de forma simplificada.

Figura 4 - Distribuição das tensões de cisalhamento considerando o efeito “shear-lag”.



Fonte: ALVA, 2000.

A largura efetiva é definida como sendo uma largura fictícia que, multiplicada pela máxima tensão atuante na laje de concreto, nos fornece a mesma resultante da distribuição real de tensões.

De maneira simplificada a largura efetiva (b) da viga mista aço-concreto pode ser calculada como:

$$b = \frac{\sigma_{med}}{\sigma_{max}} \cdot \frac{B}{2}$$

Sendo:

σ_{med} - a tensão média atuante na largura da laje;

σ_{max} - a tensão máxima atuante na largura efetiva da laje que produz a resultante igual a distribuição real das tensões sobre a laje;

B – a largura real da laje de concreto.

Segundo a NBR 8800/2008 a determinação da largura efetiva “exata” depende de diversos fatores como condição de apoio, carregamento e distribuição de momentos, razão entre espessura da laje e altura da viga, armadura presente na laje e o vão da viga, o que torna o cálculo muito trabalhoso e inviável em termos de projeto.

Para resolver este problema as normas fornecem recomendações simplificadas para o cálculo, levando em consideração o efeito “shear-lag”. Estas

simplificações foram avaliadas em alguns estudos experimentais e numéricos desenvolvidos desde então, adotando sempre o domínio elástico para a análise.

2.2.3. Conectores de Cisalhamento

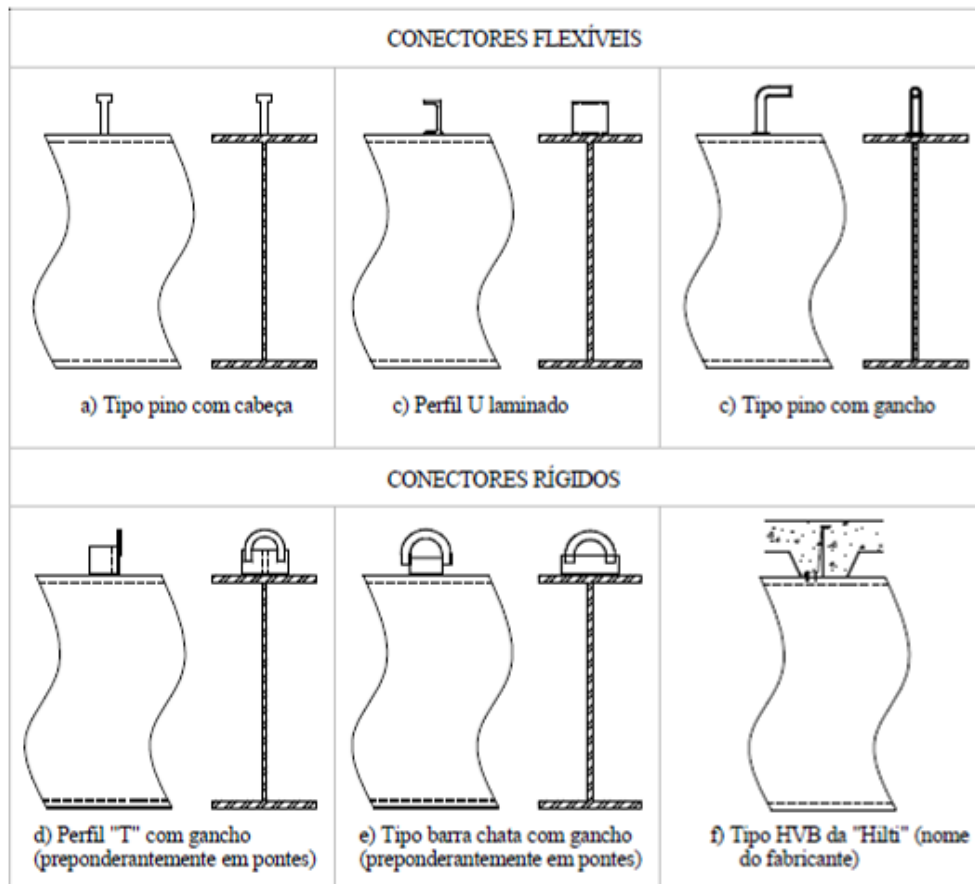
Os conectores de cisalhamento têm como função transmitir as tensões de cisalhamento longitudinais na interface aço-concreto, além de resistir às forças verticais que tendem a separar a laje da viga e garantir que o sistema trabalhe em conjunto. São utilizados os tipos mais variados de conectores sendo os mais usuais os do tipo pino com cabeça e perfil U laminado.

O conector do tipo pino com cabeça, também conhecido como “stud bolt”, caracteriza-se por ter um método mais rápido de execução. Pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento dos conectores. MALITE (1993) realizou um ensaio importante, denominado “Push-out” que analisa a relação entre a força da concentração de tensões na região do conector com o seu deslocamento, para avaliar a flexibilidade e resistência do conector em estados limites de utilização e último.

Os conectores de cisalhamento podem ser classificados em dois grupos: rígidos e flexíveis. Os conectores mais usuais são flexíveis. A Figura 5 ilustra os tipos de conectores mais comuns utilizados em vigas mistas.

Esta classificação está associada com a relação entre a força no conector e o escorregamento relativo entre o aço e concreto, que surge em resposta ao fluxo de cisalhamento longitudinal gerado pela transferência de forças entre laje de concreto e perfil de aço.

Figura 5 - Principais tipos de conectores de cisalhamento.



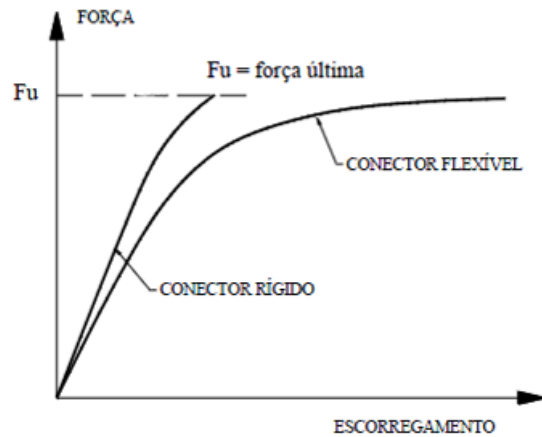
Fonte: FIGUEIREDO, 2004.

Durante a fase elástica, o comportamento da viga mista não é afetado pela ductilidade dos conectores. Porém, na fase pós-elástica, um conector flexível quando carregado pode continuar a se deformar mesmo quando atingida sua resistência máxima.

Com isso, é possível a redistribuição do fluxo de cisalhamento para os conectores mais próximos e assim permitir que todos os conectores sejam solicitados até que atinjam sua resistência máxima. Assim, a ruptura dos conectores flexíveis é do tipo dúctil.

A Figura 6 ilustra esta relação e pode-se observar o comportamento dúctil dos conectores flexíveis.

Figura 6 - Comportamento dos conectores rígidos e flexíveis.

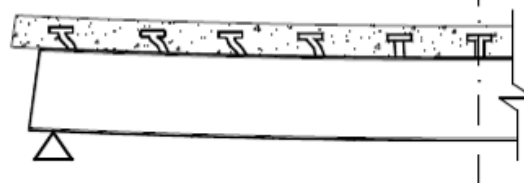


Fonte: MALITE, 1993

Esta deformação dos conectores flexíveis permite que antes da ruptura, quando atingir a resistência máxima em conectores mais solicitados, que são os próximos aos apoios, ocorra a deformação e a transferência do esforço para o conector vizinho menos solicitado, os que estão no meio do vão. A Figura 7 ilustra bem o comportamento dos conectores dúcteis ao longo da viga.

Desta maneira, utilizando conectores flexíveis é possível dimensionar a viga mista espaçando-os igualmente ao longo da viga sem que haja comprometimento na resistência da viga.

Figura 7 - Comportamento dos conectores ao longo da viga mista.



Fonte: FABRIZZI, 2007.

De acordo com a NBR 8800, a força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento tipo pino com cabeça é dada pelo menor dos valores seguintes:

$$Q_{rd} = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \text{ e } Q_{rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}}$$

Onde:

- γ_{cs} - é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações excepcionais;
- A_{cs} - é a área da seção transversal do conector;
- F_{ucs} - é a resistência à ruptura do aço do conector;
- E_c - é o módulo de elasticidade do concreto;
- R_g, R_p - fatores que consideram a redução de resistência do conector quando usado em lajes com fôrma de aço incorporada; para lajes maciças $R_g = R_p = 1$.

De acordo com a NBR 8800, a força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento tipo perfil U é dada por:

$$Q_{rd} = \frac{0,3(t_{fcs} + 0,5 * t_{wcs}) * L_{cs} * \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}}$$

Onde:

- γ_{cs} - é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações excepcionais;
- t_{fcs} - espessura da mesa do perfil;
- t_{wcs} - espessura da alma do perfil;
- L_{cs} - comprimento do perfil;

O número de conectores tem que ser analisado, no caso de vigas mistas contínuas, em dois trechos: um entre o máximo momento fletor e o apoio externo e o outro entre os dois máximos momentos fletores. O número de conectores para cada seção será a menor carga entre compressão e tração dividida pela força resistente do conector.

A norma NBR 8800/2008 ainda comenta em relação ao espaçamento máximo e mínimo dos conectores do tipo pino com cabeça:

- O espaçamento longitudinal mínimo entre conectores, deve ser igual a seis diâmetros ao longo do vão da viga, podendo ser reduzido para quatro diâmetros no caso de laje com fôrma de aço incorporada.

- O espaçamento longitudinal máximo entre conectores deve ser igual a oito vezes a espessura total da laje. Caso a laje possua fôrmas de aço incorporada, com nervuras perpendiculares ao perfil de aço, esse espaçamento também não deve ser superior a 915mm.

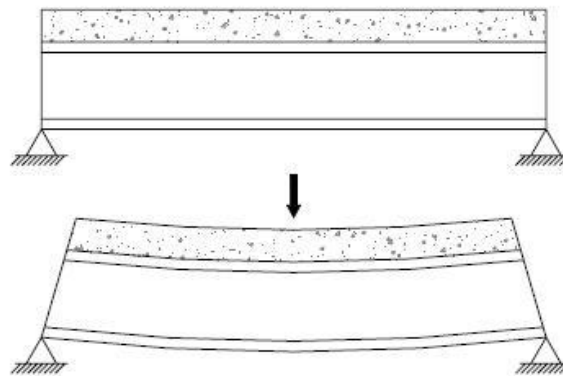
2.2.4. Vigas mistas biapoiadas

As vigas mistas biapoiadas possuem a função apenas de suportar os esforços provenientes das lajes e nelas as ligações nos apoios podem ser consideradas como rótulas. As vigas mistas simplesmente apoiadas estão submetidas exclusivamente por momento fletores positivos (Figura 8). Neste caso, a laje de concreto encontra-se comprimida e o perfil de aço tracionado.

A mesa superior do perfil de aço garante sua estabilidade quando comprimida através da ligação feita pelos conectores à laje de concreto. A laje de concreto tem sua estabilidade lateral garantida porque apresenta uma rigidez infinita no seu plano.

Os momentos fletores e as forças cortantes nas vigas mistas simplesmente apoiadas não são influenciados pela fissuração, fluência e retração do concreto.

Figura 8 - Vigas mistas biapoiadas.



Fonte: DAVID, 2009.

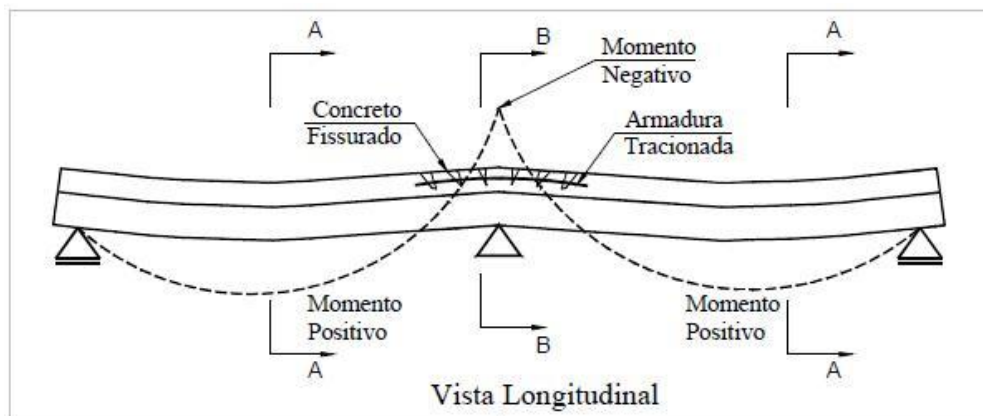
2.2.5. Vigas mistas contínuas e semi-contínuas

As vigas mistas contínuas apresentam continuidade total nos apoios internos do perfil de aço e da armadura da laje. Em vigas mistas contínuas, além de estarem submetidas a momentos fletores positivos encontram-se também, nas regiões dos apoios, submetidas a momentos fletores negativos (Figura 9).

A vantagem das vigas mistas contínuas é o ganho de rigidez global da estrutura. Porém a grande desvantagem é que esses momentos fletores negativos provocam tração na laje de concreto que não resiste bem e isso, conseqüentemente, causa a fissuração. Diferentemente das vigas mistas biapoiadas, as vigas mistas contínuas e semi-contínuas encontram sua mesa inferior comprimida e, por estar livre, sujeita a flambagem local.

Diferentemente das vigas simplesmente apoiadas, os efeitos de fissuração, fluência e retração do concreto influenciam na determinação das tensões e deformações, dificultando os cálculos e perdendo a precisão.

Figura 9 - Vigas mistas contínuas



Fonte: DAVID, 2009.

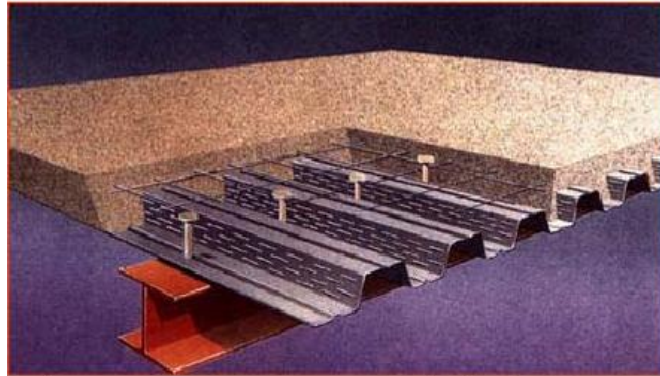
2.2.6. Vigas mistas com laje steel-deck (especificações da norma brasileira)

As lajes tipo “steel-deck” são elementos formados por forma de aço e camada de concreto moldada ‘in-loco’ agindo conjuntamente (Figura 10). Assim, o elemento por si só já retrata um elemento misto. Este tipo de laje possui algumas vantagens:

- diminuição ou até mesmo eliminação do escoramento;
- utilização da fôrma de aço como plataforma de serviço e proteção aos operários que trabalham nos andares inferiores durante a construção;
- fôrma de aço funciona como armadura positiva da laje;
- alta qualidade de acabamento da face interna da laje;

- dispensa de escoramento e redução dos gastos com desperdício de material;
- facilidade de instalação e maior rapidez construtiva;
- apresenta facilidade para a passagem de dutos das diversas instalações, favorecendo também a fixação de forros.

Figura 10 - Laje mista aço-concreto tipo “steel deck”



Fonte: www.codeme.com.br

O comportamento das lajes mistas está entre o da laje maciça de concreto armado e da viga mista. De certa maneira, o “steel-deck” comporta-se como armadura incorporada ao concreto, porém com a desvantagem de não estar totalmente envolvido pelo concreto. Mas também possui rigidez à flexão como uma viga mista, podendo se deformar quando submetido a solicitações.

As vigas mistas composta com o perfil de aço e a laje mista são facilmente obtidas, pois a ancoragem dos conectores de cisalhamento é feito na própria armadura da laje.

2.2.7. Resistência ao momento fletor

A determinação da resistência ao momento fletor depende da classe, referente à relação entre a largura e a espessura da alma. Segundo a norma brasileira determina-se dois tipos de seção em relação à classe: seções compactas e semi-esbeltas. As seções compactas são referentes às classes 1 e 2 que permitem a plastificação total da seção mista, e as seções semi-esbeltas pertencentes à classe 3 são quando a alma pode sofrer flambagem local no regime inelástico.

As vigas “compactas” se definem quando:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

As vigas com seção de aço compacta devem ter os momentos resistentes determinados no regime plástico. No caso de interação completa deve-se verificar a posição da linha neutra, onde poderão ocorrer duas situações:

- linha neutra plástica na laje: $Q_n \geq (Af_y)_a$ e $(Af_y)_a \leq 0,66f_{ck}bt_c$
- linha neutra plástica na viga de aço: $Q_n \geq 0,85f_{ck}bt_c$ e $(Af_y)_a \geq 0,66f_{ck}bt_c$

Os seguintes índices devem ser encontrados:

ÍNDICES	SÍMBOLO	UNID
Largura efetiva	L	cm
Coef. de homogeneização (curta duração)	n	-
Posição do centro de gravidade	ycg	cm
Momento de inércia	I	cm ⁴
Coef. de homogeneização (longa duração)	n	-
Posição do centro de gravidade	ycg	cm
Momento de inércia	I	cm ⁴
Índice de esbeltez	λ	-
Força resistente de compressão	C	kN
Força resistente de tração	T	kN
Profundidade da linha neutra	a	cm
Momento resistente de cálculo	Mrd	kN.m

A interação parcial ocorre quando as seguintes condições são atendidas:

$$Q_n < 0,85f_{ck}bt_c \text{ e } Q_n < (Af_y)_a$$

O grau de conexão mínimo é de 50%. Cumpridas essas condições, então podemos calcular novas resultante para substituir na fórmula do momento resultante dada por:

$$M_{rd} = C_{ad}(d - y_c - y_t) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_f + d - y_t \right)$$

$$\text{Onde: } a = \frac{C}{0,66f_{ck}b}$$

$$\text{As vigas "semi-esbeltas" se definem quando: } 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h_w}{t_w} \leq 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

No caso de interação completa o momento resistente deve ser determinado pelo processo elástico e para isso deve-se tomar como base nas propriedades da

seção mista homogeneizada. Na seção mista homogeneizada encontra-se a posição da linha neutra na laje de concreto ou no perfil de aço.

Nas regiões de momentos negativos percebe-se uma instabilidade na estrutura, pois a compressão atinge também o perfil metálico ao invés de se restringir somente à laje de concreto. A norma brasileira antiga permite que a resistência de vigas mistas sob momentos negativos seja tratada igual a de uma viga de aço isolada, não considerando a armadura longitudinal na resistência.

2.2.8. Resistência à força cortante

Segundo Alva (2000) a resistência à força cortante em vigas mistas deve ser determinada considerando-se apenas a resistência da viga de aço.

Para o cálculo da força cortante resistente de cálculo, tem-se o primeiro termo que se refere à parcela resistente da seção de concreto, o segundo termo à parcela resistente da armadura transversal e o terceiro termo à parcela resistente da forma de aço se a laje for mista. Deve-se ter: $V_{sd} < V_{rd}$

Segundo Fuzihara (2006), a maioria das vigas de aço possui uma espessura de mesa suficiente para evitar a flambagem por cisalhamento, tornando o cálculo mais simples.

3. Estudo de Caso

3.1. Exemplo 1:

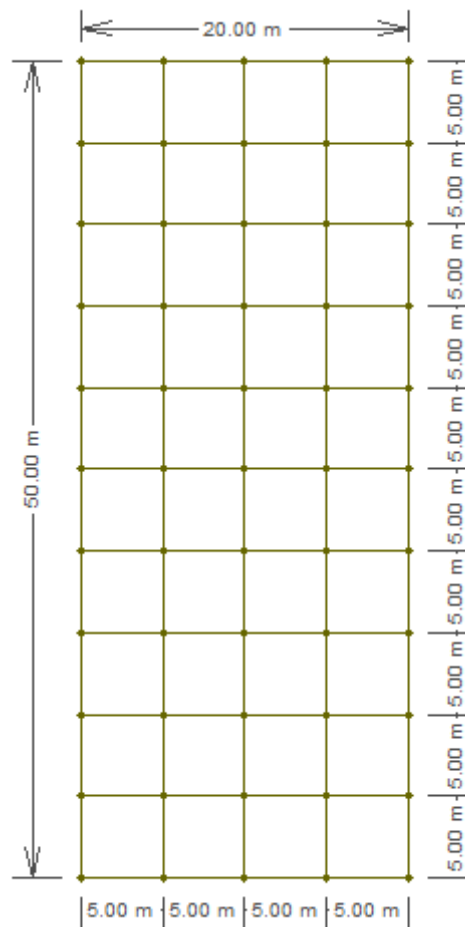
O estudo de caso consiste no pré-dimensionamento das vigas mistas para um edifício comercial. A edificação possui uma planta baixa de 1000 m², (Figura 11), com três pavimentos e pé-direito de 3,80 metros. As vigas mistas são formadas por um perfil de aço laminado tipo “W” e laje maciça de concreto com espessura de 17 cm. O tipo de construção considerada foi escorada.

Pré-dimensionamento da laje: $h/25 < h < h/35$.

$$\frac{500}{25} = 20\text{cm} > h_{\text{laje}} > \frac{500}{35} = 14,28\text{cm} \rightarrow \text{Adotou-se a altura da laje: } h_{\text{laje}} = 17\text{cm para}$$

obter a linha neutra plástica na laje de concreto.

Figura 11 - Planta baixa do edifício comercial.



Fonte: Ftool

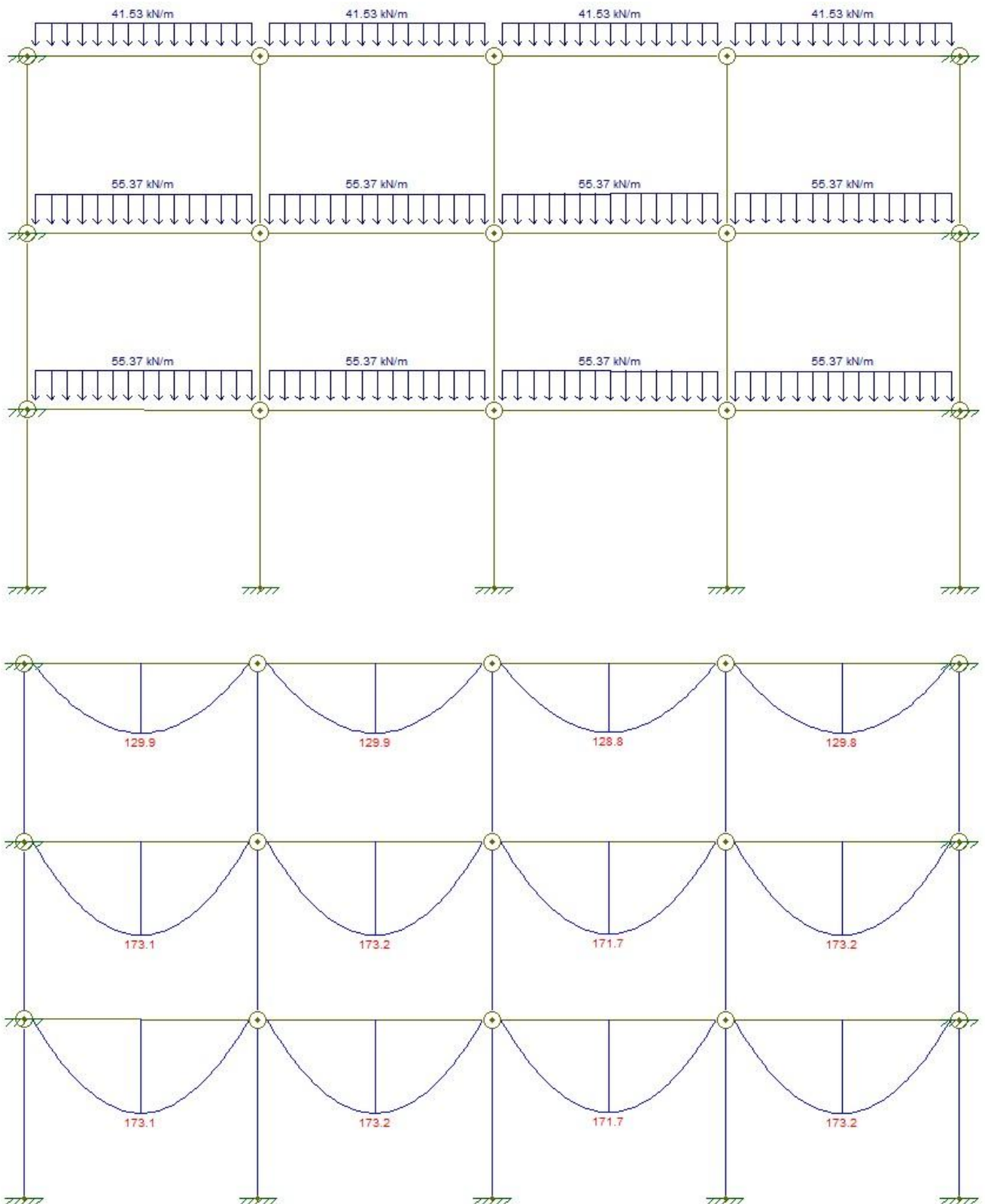
As ações consideradas estão descritas na Tabela 1. O cálculo dos esforços solicitantes e da área de influência da laje sobre a viga permitiu obtenção da carga total distribuída sobre os pórticos de cada pavimento. A carga na cobertura do edifício considerou apenas 60% da carga total nos pavimentos tipo. As Figuras 12 e 13 mostram a carga total no pórtico do edifício com vigas simplesmente apoiadas e vigas contínuas, respectivamente, e depois seu respectivo diagrama de esforço solicitante quando submetido à flexão. Os diagramas foram obtidos através do programa computacional "Ftool".

Tabela 1 - Ações permanentes no edifício exemplo.

Ações Permanentes	
Parede	8,32 KN/m ²
Peso próprio da laje mista:	2,5 KN/m ²
Argamassa de nivelamento:	Não será considerado
Revestimento:	1,5 KN/m ²
Peso próprio do perfil:	0,5 KN/m ²

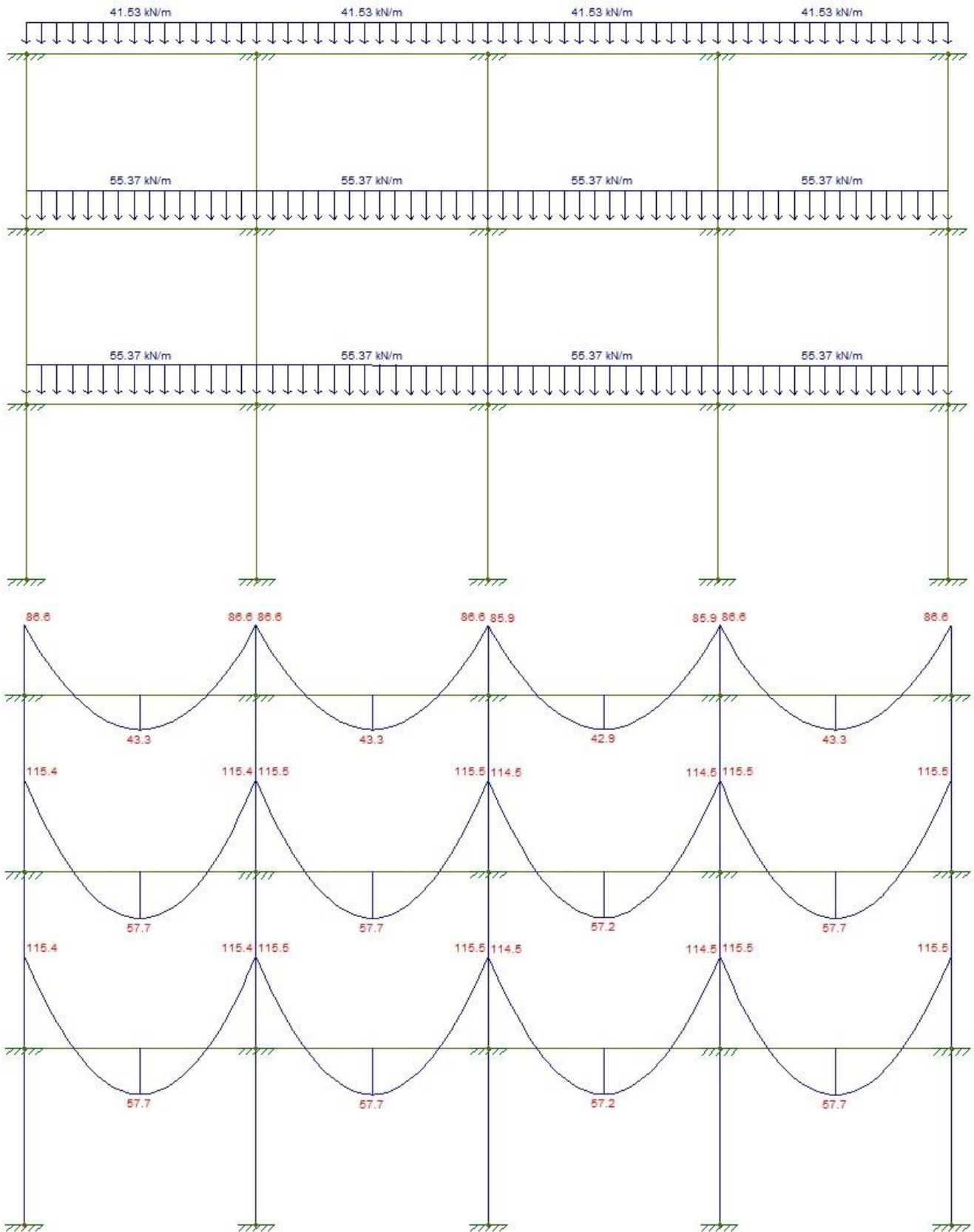
A sobrecarga de utilização considerada nos pisos e na cobertura será 3,0 KN/m².

Figura 12 - Pórtico do edifício exemplo com vigas simplesmente apoiadas.



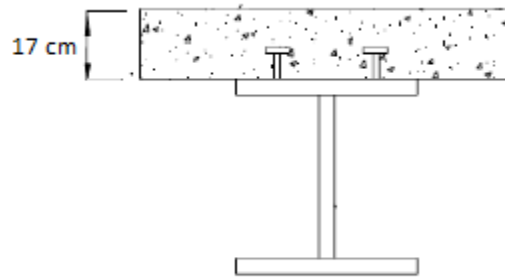
Fonte: Ftool

Figura 13 - Pórtico do edifício exemplo com vigas contínuas.



Fonte: Ftool

Figura 14 – Seção transversal – viga de aço + laje maciça



Fonte: Arquivo pessoal

3.1.1. Viga mista biapoiada

Uma vez obtida o momento fletor solicitante, calcula-se o momento fletor resistente do perfil adotado, seguindo as recomendações da NBR 8800. Para a viga mista biapoiada o perfil adotado será W 310 x 38,7 pois atende a seguinte condição:

$$W > W_{\min} = \frac{M_{sd}}{\sigma_{adm}} = \frac{17320}{34,5} = 502,03 \text{ cm}^3$$

Dados:

a) Materiais:

- aço do perfil: Gerdau-Açominas

$$f_u = 450 \text{ MPa}$$

$$f_y = 345 \text{ MPa}$$

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

- concreto:

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$E_c = 24.691 \text{ MPa}$$

b) Dimensões da viga de aço:

$$d = 310 \text{ mm} \qquad bf = 165 \text{ mm}$$

$$hw = 290,6 \text{ mm} \qquad tf = 9,7 \text{ mm}$$

$$tw = 5,8 \text{ mm}$$

c) Características geométricas:

- Vigas de aço:

$$A = 49,7 \text{ cm}^2 \qquad W_x = 554 \text{ cm}^3$$

$$I_x = 8581 \text{ cm}^4 \qquad Z_x = 615 \text{ cm}^4$$

- Largura efetiva:

Seguindo as recomendações da NBR 8800, temos:

$$\frac{L}{8} = \frac{500}{8} = 62,5cm$$

- Seção homogeneizada:

Coeficiente de homogeneização:

$$n = \frac{E}{E_c} = \frac{200000}{24691} = 8,40 \quad (\text{ações de curta duração})$$

$$n = 3 * 8,40 = 25,2 \quad (\text{ações de longa duração})$$

- Momento de inércia da seção homogeneizada:

Para $n = 8,40$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{8,5x\left(\frac{62,5}{8,40}x17\right) + 32,5x49,7}{\frac{62,5}{8,40}x17 + 49,7} = 15,27cm$$

Momento de inércia:

$$I_{rr} = (15,27 - 8,5)^2x\left(\frac{62,5}{8,40}x17\right) + \frac{62,5}{8,40}x\frac{17^3}{12} + (32,5 - 15,27)x49,7 + 8581$$

$$I_{rr} = 32.179cm^4$$

Para $n = 25,2$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{8,5x\left(\frac{62,5}{25,2}x17\right) + 32,5x49,7}{\frac{62,5}{25,2}x17 + 49,7} = 21,48cm$$

Momento de inércia:

$$I_{rr} = (21,48 - 8,5)^2x\left(\frac{62,5}{25,2}x17\right) + \frac{62,5}{25,2}x\frac{17^3}{12} + (32,5 - 21,48)x49,7 + 8581$$

$$I_{rr} = 22.735cm^4$$

Cálculo do momento resistente admitindo interação total:

Inicialmente determina-se a classe da alma da viga de aço:

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{290,6}{5,8} = 50,10 < 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53 \rightarrow \text{classe 2}$$

Assim, determina-se a viga “compacta”.

Determina-se a força resistente de compressão e tração, respectivamente, por:

$$C_{cd} = \frac{0,85 * f_{ck} * L_e * t_c}{\gamma_c} = \frac{0,85 * 2,5 * 62,5 * 17}{1,4} = 1612,72 \text{ kN}$$

$$T_{ad} = \frac{A_a * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{49,7 * 34,5}{1,1} = 1558,77 \text{ kN}$$

Como $C_{cd} > T_{ad}$, a linha neutra plástica se encontra na laje de concreto.

Profundidade da linha neutra da seção plastificada:

$$a = \frac{1558,77 * 1,4}{0,85 * 2,5 * 62,5} = 16,43 \text{ cm}$$

O momento resistente de cálculo é igual a:

$$M_{rd} = T_{ad} \left(d_1 + h_f + t_c - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_{rd} = 1558,77 \left(15,5 + 17 - \frac{16,43}{2} \right) = 37.853,78 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 378,54 \text{ kN.m} > M_{sd} = 173,20 \text{ kN.m (ok!)}$$

Cálculo do momento resistente admitindo-se ligação parcial:

Para calcular a resistência global da conexão aço-concreto (Q_n) utiliza-se o valor mínimo do grau de conexão dado por:

$$\eta = 1 - \frac{200000}{578 * 345} (0,75 - 0,03 * 5) = 0,60 = 60\%$$

O novo valor resultante de compressão do concreto é dado por:

$$\sum Q_d = 0,6 * 1558,77 = 935,26 \text{ kN} = C_{cd}$$

A linha neutra no concreto está situada a uma profundidade igual a:

$$a = \frac{935,26}{0,85 * 2,5 * 62,5} = 7,04 \text{ cm}$$

A resultante de compressão do aço é calculada por:

$$C_{ad} = \frac{1558,77 - 935,26}{2} = 311,75kN$$

E com:

$$A_{af} f_{yd} = 16,5 * 0,97 * \left(\frac{34,5}{1,1} \right) = 501,98kN$$

$C_{ad} < A_{af} f_{yd}$, então, tem-se que a linha neutra no perfil de aço passa pela mesa superior, a uma profundidade, medida pela face superior do perfil, igual a:

$$y_p = \frac{311,75}{501,98} * 0,97 = 0,60cm$$

Logo a posição do centro de gravidade da seção de aço comprimida, medida a partir da face superior do perfil é dada por:

$$y_c = \frac{0,60}{2} = 0,30cm$$

E a posição do centro de gravidade da seção de aço tracionada, medida a partir da face inferior do perfil é dada por:

$$y_t = \frac{0,97 * 16,5 * \frac{0,97}{2} + 0,58 * 29,1 * \left(\frac{29,1}{2} + 0,97 \right) + (0,97 - 0,60) * 16,5 * \left(\frac{(0,97 - 0,60)}{2} + 29,1 + 0,97 \right)}{0,97 * 16,5 + 0,58 * 29,1 + (0,97 - 0,60) * 16,5}$$

$$y_t = 11,64cm$$

O cálculo do momento resistente é dado por:

$$M_{rd} = C_{ad} (d - y_c - y_t) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_f + d - y_t \right)$$

$$M_{rd} = 311,75(31 - 0,30 - 11,64) + 935,26 \left(17 - \frac{7,04}{2} + 31 - 11,64 \right) = 36.659,8kN.cm$$

$$M_{rd} = 366,59 \text{ kN.m} > M_{sd} = 173,20 \text{ kN.m (ok!)}$$

Para interação total temos:

Largura efetiva	L	cm	62,5
Coef. de homogeneização (curta duração)	n	-	8,4
Posição do centro de gravidade	ycg	cm	15,27
Momento de inércia	I	cm ⁴	32.179,00
Coef. de homogeneização (longa duração)	n	-	25,2
Posição do centro de gravidade	ycg	cm	21,48
Momento de inércia	I	cm ⁴	22.735,00
Índice de esbeltez	λ	-	50,1
Força resistente de compressão	C	kN	1.612,72

Força resistente de tração	T	kN	1.558,77
Profundidade da linha neutra	a	cm	16,43
Momento resistente de cálculo	Mrd	kN.m	378,54

Para interação parcial temos:

Grau de conexão	η	%	60
Novo resultante de compressão do concreto	Ccd	kN	935,26
Profundidade da linha neutra	a	cm	7,04
Resultante de compressão do aço	Cad	kN	311,75
Resultante de compressão do aço	Aaffyd	kN	501,98
Profundidade da linha neutra na mesa superior	yp	cm	0,6
Posição do centro de gravidade na seção de aço comprimida	yc	cm	0,3
Posição do centro de gravidade na seção de aço tracionada	yt	cm	11,64
Momento resistente de cálculo positivo	Mrd	kN.m	366,59

A Tabela 2 indica os momentos solicitantes e resistentes referentes ao pórtico de vigas simplesmente apoiadas.

Tabela 2 - Momentos fletores da viga mista biapoiada exemplo.

		Momento Solicitante (M_{sd})		Momento Resistente de Cálculo (M_{rd})	
		Momento Positivo	Momento Negativo	Momento Positivo	Momento Negativo
Viga mista biapoiada	Interação Total	173,20 kN.m	-	378,54 kN.m	-
	Interação Parcial	173,20 kN.m	-	366,59 kN.m	-

Ligação aço-concreto: conectores de cisalhamento

- Adotando o conector do tipo pino com cabeça (stud bolt) (\varnothing 15,9mm).

$$F_{ucs} = 41,5 \text{ MPa.}$$

Para obter a resistência individual do conector adota-se o menor dos seguintes valores:

$$Q_{rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} = \frac{0,5 * 1,98 \sqrt{2,5 * 24691}}{1,25} = 196,77 \text{ kN}$$

$$Q_{rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = \frac{1,98 * 41,5}{1,25} = 65,7 kN$$

Portanto a resistência de um conector é igual a 65,7 kN.

O número de conectores para a ligação total é igual a:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1558,77}{65,7} \cong 24 \text{ conectores}$$

O espaçamento longitudinal entre os conectores é igual a:

$$e = \frac{2500}{24} \cong 104 mm$$

Os espaçamentos mínimos e máximos, respectivamente, recomendado pela NBR 8800 são:

$$e_{m\acute{a}x} = 8t_c = 1360 mm$$

$$e_{m\acute{i}n} = 6 * 15,9 = 95,4 mm$$

Portanto, os critérios de espaçamento estão satisfeitos.

O número de conectores para a ligação parcial é igual a:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{935,26}{65,7} \cong 15 \text{ conectores}$$

O espaçamento longitudinal entre os conectores é igual a:

$$e = \frac{2500}{15} \cong 167 mm$$

- Adotando o conector do tipo perfil U, com espessura de 4,76mm, comprimento de 100mm e altura de 75mm.

A resistência do conector é dada por:

$$Q_{rd} = \frac{0,3(t_{fcs} + 0,5 * t_{wcs}) * L_{cs} * \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} = \frac{0,3(0,48 + 0,5 * 0,48) * 10 * \sqrt{2,5 * 24691}}{1,25}$$

$$Q_{rd} = 429,32 kN$$

O número de conectores para a ligação total é igual a:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1558,77}{429,32} \cong 4 \text{ conectores}$$

O espaçamento longitudinal entre os conectores é igual a:

$$e = \frac{2500}{4} \cong 625mm$$

O espaçamento mínimo para o conector perfil U, recomendado pela NBR 8800, será o maior dos seguintes valores:

$$e = 4 * 100 = 400mm$$

$$e = 4 * 75 = 300mm$$

Portanto o espaçamento mínimo entre os conectores foi atendido.

O número de conectores para a ligação parcial é igual a:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{935,26}{429,32} \cong 3 \text{ conectores}$$

O espaçamento longitudinal entre os conectores é igual a:

$$e = \frac{2500}{3} \cong 833mm$$

3.1.2. Viga mista contínua

O maior momento fletor solicitante, no caso da viga mista contínua, é o momento fletor negativo que se encontra na região dos apoios. Para a viga mista contínuas perfil adotado será W 200 x 35,9, pois, atende a seguinte condição:

$$W > W_{\min} = \frac{M_{sd}}{\sigma_{adm}} = \frac{11550}{34,5} = 334,78cm^3$$

Dados:

a) Materiais:

- aço do perfil: Gerdau-Açominas

$$f_u = 45 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_y = 345 \text{ MPa}$$

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

- concreto:

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$E_c = 24.691 \text{ MPa}$$

b) Dimensões da viga de aço:

$$d = 201 \text{ mm}$$

$$bf = 165 \text{ mm}$$

$$hw = 181 \text{ mm}$$

$$tf = 10,2 \text{ mm}$$

$$t_w = 6,2 \text{ mm}$$

c) Características geométricas:

- Vigas de aço:

$$A = 45,7 \text{ cm}^2 \quad W_x = 342 \text{ cm}^3$$

$$I_x = 3437 \text{ cm}^4 \quad Z_x = 380 \text{ cm}^4$$

d) Armadura longitudinal:

$$F_{sy} = 500 \text{ MPa}$$

$$A_s = 7,85 \text{ cm}^2$$

Diâmetro das barras: 10 mm.

Distância do centro de gravidade das barras à face superior da laje: 30 mm.

- Largura efetiva:

$$b = 0,125L = 62,5 \text{ cm (na região do apoio interno)}$$

$$b = 0,200L = 100 \text{ cm (na metade do vão da viga)}$$

- Seção homogeneizada:

Seção “não fissurada”

Para $n=8,40$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 * 7,85 + 8,5x \left(\frac{62,5}{8,40} x 17 \right) + 32,5x45,7}{7,85 + \frac{62,5}{8,40} x 17 + 45,7} = 14,35 \text{ cm}$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (14,35 - 3)^2 * 7,85 + (14,35 - 8,5)^2 x \left(\frac{62,5}{8,40} x 17 \right) + \frac{62,5}{8,40} x \frac{17^3}{12} + (32,5 - 14,35)x45,7 + 3437$$

$$I_{tr} = 31369,6 \text{ cm}^4$$

Para $n=25,2$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 * 7,85 + 8,5x \left(\frac{62,5}{25,2} x 17 \right) + 32,5x45,7}{7,85 + \frac{62,5}{25,2} x 17 + 45,7} = 19,51cm$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (19,51 - 3)^2 * 7,85 + (19,51 - 8,5)^2 x \left(\frac{62,5}{25,2} x 17 \right) + \frac{62,5}{25,2} x \frac{17^3}{12} + (32,5 - 19,51)x45,7 + 3437$$

$$I_{tr} = 21998,76cm^4$$

Seção “fissurada”:

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 * 7,85 + 32,5x45,7}{7,85 + 45,7} = 28,18cm$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (28,18 - 3)^2 * 7,85 + (32,5 - 28,18)x45,7 + 3437 = 9267,02cm^4$$

Seção na metade do vão: ($b=100cm$)

Para $n=8,40$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 * 7,85 + 8,5x \left(\frac{100}{8,40} x 17 \right) + 32,5x45,7}{7,85 + \frac{100}{8,40} x 17 + 45,7} = 10,64cm$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (10,64 - 3)^2 * 7,85 + (10,64 - 8,5)^2 x \left(\frac{100}{8,40} x 17 \right) + \frac{100}{8,40} x \frac{17^3}{12} + (32,5 - 10,64)x45,7 + 3437$$

$$I_{tr} = 34964,57cm^4$$

Para $n=25,2$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 \cdot 7,85 + 8,5 \cdot \left(\frac{100}{25,2} \cdot 17 \right) + 32,5 \cdot 45,7}{7,85 + \frac{100}{25,2} \cdot 17 + 45,7} = 15,81 \text{ cm}$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (15,81 - 3)^2 \cdot 7,85 + (15,81 - 8,5)^2 \cdot x \left(\frac{100}{25,2} \cdot 17 \right) + \frac{100}{25,2} \cdot x \frac{17^3}{12} + (32,5 - 15,81) \cdot 45,7 + 3437$$

$$I_{tr} = 25571,95 \text{ cm}^4$$

Tabela 3 - Momentos de inércia da seção homogeneizada.

Tipo da ação	N	Seção dos apoios		Seção na metade do vão
		"não fissurada"	"fissurada"	
Curta duração (variável)	8,40	31.369,60 cm ⁴	9.267,02 cm ⁴	34.964,57 cm ⁴
Longa duração (permanente)	25,2	21.998,76 cm ⁴	9.267,02 cm ⁴	25.571,95 cm ⁴

Cálculo do momento resistente negativo admitindo interação total:

$$R_s = \frac{7,85 \cdot 50}{1,15} = 341 \text{ kN}$$

$$R_w = \frac{18,1 \cdot 0,62 \cdot 34,5}{1,1} = 351,96 \text{ kN}$$

Como: $R_s < R_w$, a linha neutra intercepta a alma.

O momento resistente de cálculo é igual a:

$$M_{rd} = (M_{pl,Rd})_a + R_s \left(\frac{d}{2} + h_s \right) - \frac{R_s^2}{R_w} \frac{h_w}{4}$$

$$(M_{pl,Rd})_a = \frac{380 \cdot 34,5}{1,1} = 11.918,18 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 11.918,18 + 341 \left(\frac{20,1}{2} + 14 \right) - \frac{341^2}{351,96} \frac{18,1}{4} = 18.628,92 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 186,29 \text{ kN.m} > M_{sd} = 115,50 \text{ kN.m (ok!)}$$

Cálculo do momento resistente negativo admitindo interação parcial:

$$R_s = \frac{7,85 \times 50}{1,15} = 341 \text{ kN}$$

$$R_w = \frac{18,1 \times 0,62 \times 34,5}{1,1} = 351,96 \text{ kN}$$

Como: $R_s < R_w$, a linha neutra intercepta a alma.

O momento resistente de cálculo é igual a:

$$M_{rd} = (M_{pl,Rd})_a + R_s \left(\frac{d}{2} + h_s \right) - \frac{R_s^2}{R_w} \frac{h_w}{4}$$

$$(M_{pl,Rd})_a = 0,6 * \left(\frac{380 * 34,5}{1,1} \right) = 7150,91 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 7150,91 + 341 \left(\frac{20,1}{2} + 14 \right) - \frac{341^2}{351,96} \frac{18,1}{4} = 13.861,65 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 138,62 \text{ kN.m} > M_{sd} = 115,50 \text{ kN.m (ok!)}$$

Cálculo do momento resistente positivo admitindo interação total:

Inicialmente determina-se a classe da alma da viga de aço:

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{181}{6,2} = 29,19 < 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53 \rightarrow \text{classe 2, pois } \lambda_{pl} = 67$$

Assim, determina-se a viga “compacta”.

$$C_{cd} = \frac{0,85 * f_{ck} * L_e * t_c}{\gamma_c} = \frac{0,85 * 2,5 * 100 * 17}{1,4} = 2580,36 \text{ kN}$$

$$T_{ad} = \frac{A_a * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{45,7 * 34,5}{1,1} = 1433,32 \text{ kN}$$

Como $C_{cd} > T_{ad}$, a linha neutra plástica se encontra na laje de concreto.

Profundidade da linha neutra da seção plastificada:

$$a = \frac{1433,32 * 1,4}{0,85 * 2,5 * 100} = 9,44 \text{ cm}$$

O momento resistente de cálculo é igual a:

$$M_{rd} = T_{ad} \left(d_1 + h_f + t_c - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_{rd} = 1433,32 \left(10,05 + 17 - \frac{9,44}{2} \right) = 32.006,03 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 320,06 \text{ kN.m} > M_{sd} = 57,70 \text{ kN.m (ok!)}$$

Cálculo do momento resistente positivo admitindo-se ligação parcial:

O novo valor resultante de compressão do concreto é dado por:

$$\sum Q_d = 0,6 * 1433,32 = 859,99 \text{ kN} = C_{cd}$$

A linha neutra no concreto está situada a uma profundidade igual a:

$$a = \frac{859,99}{0,85 * 2,5 * 100} = 4,05 \text{ cm}$$

A resultante de compressão do aço é calculada por:

$$C_{ad} = \frac{1433,32 - 859,99}{2} = 286,665 \text{ kN}$$

E com:

$$A_{af} f_{yd} = 16,5 * 1,02 * \left(\frac{34,5}{1,1} \right) = 527,85 \text{ kN}$$

$C_{ad} < A_{af} f_{yd}$, então, tem-se que a linha neutra no perfil de aço passa pela mesa superior, a uma profundidade, medida pela face superior do perfil, igual a:

$$y_p = \frac{286,665}{527,85} * 1,02 = 0,55 \text{ cm}$$

Logo a posição do centro de gravidade da seção de aço comprimida, medida a partir da face superior do perfil é dada por:

$$y_c = \frac{0,55}{2} = 0,28 \text{ cm}$$

E a posição do centro de gravidade da seção de aço tracionada, medida a partir da face inferior do perfil é dada por:

$$y_t = \frac{1,02 * 16,5 * \frac{1,02}{2} + 0,62 * 18,1 * \left(\frac{18,1}{2} + 1,02 \right) + (1,02 - 0,55) * 16,5 * \left(\frac{(1,02 - 0,55)}{2} + 18,1 + 1,02 \right)}{1,02 * 16,5 + 0,62 * 18,1 + (1,02 - 0,55) * 16,5}$$

$$y_t = 7,59 \text{ cm}$$

O cálculo do momento resistente é dado por:

$$M_{rd} = C_{ad}(d - y_c - y_t) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_f + d - y_t \right)$$

$$M_{rd} = 286,665(20,1 - 0,28 - 7,59) + 859,99 \left(17 - \frac{4,05}{2} + 20,1 - 7,59 \right) = 27.142,74 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 271,43 \text{ kN.m} > M_{sd} = 57,70 \text{ kN.m (ok!)}$$

Para interação total temos:

Largura efetiva (na região do apoio interno)	L	cm	62,5
Força resistente transversal da armadura	Rs	kN	341
Força resistente transversal da alma	Rw	kN	351,96
Momento resistente de cálculo negativo	Mrd	kN.m	186,29
Largura efetiva (na metade do vão da viga)	L	cm	100
Índice de esbeltez	l	-	29,19
Força resistente de compressão	C	kN	2.580,36
Força resistente de tração	T	kN	1.433,32
Profundidade da linha neutra	a	cm	9,44
Momento resistente de cálculo positivo	Mrd	kN.m	320,06

Para interação parcial temos:

Grau de conexão	h	%	60
Momento resistente de cálculo negativo	Mrd	kN.m	138,62
Novo resultante de compressão do concreto	Ccd	kN	859,99
Profundidade da linha neutra	a	cm	4,05
Resultante de compressão do aço	Cad	kN	286,66
Resultante de compressão do aço	Aaffyd	kN	527,85
Profundidade da linha neutra na mesa superior	yp	cm	0,55
Posição do centro de gravidade na seção de aço comprimida	yc	cm	0,28
Posição do centro de gravidade na seção de aço tracionada	yt	cm	7,59
Momento resistente de cálculo positivo	Mrd	kN.m	271,43

A Tabela 4 indica os momentos solicitantes e resistentes referentes ao pórtico de vigas mistas contínuas.

Tabela 4 – Momentos fletores da viga mista contínua exemplo.

		Momento Solicitante (M_{sd})		Momento Resistente de Cálculo (M_{rd})	
		Momento Positivo	Momento Negativo	Momento Positivo	Momento Negativo
Viga mista contínua	Interação Total	57,70 kN.m	115,50 kN.m	320,06 kN.m	186,29 kN.m
	Interação Parcial	57,70 kN.m	115,50 kN.m	271,43 kN.m	138,62 kN.m

Ligação aço-concreto – conectores de cisalhamento:

Para a determinação da resistência da ligação, é necessário analisar dois trechos da viga.

O trecho entre o apoio externo e o máximo momento positivo:

$$\sum Q_{rd} = \min imo(T_{ad}, C_{cd}) = 1433,32kN$$

E o trecho entre a seção do máximo momento positivo até o máximo momento negativo (região dos apoios):

$$\sum Q_{rd} = \min imo(T_{ad}, C_{cd}) + R_s = 1433,32 + 341 = 1774,32kN$$

- Adotando o conector do tipo pino com cabeça (stud bolt) ($\varnothing 15,9mm$; $f_{ucs}=41,5MPa$ tem-se:

$$Q_{rd} = 65,7kN$$

O número de conectores de cisalhamento e o espaçamento longitudinal, para os dois trechos distintos, admitindo interação total, podem ser determinados por:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1433,32}{65,7} \cong 22 \text{ conectores ; } e = \frac{2500}{22} \cong 114mm$$

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1774,32}{65,7} \cong 27 \text{ conectores ; } e = \frac{2500}{27} \cong 93mm$$

Portanto:

$$n = \frac{(22+27)}{2} \cong 25 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{25} \cong 100mm$$

O número de conectores de cisalhamento e o espaçamento longitudinal, para os dois trechos distintos, admitindo interação parcial, podem ser determinados por:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{859,99}{65,7} \cong 14 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{14} \cong 179mm$$

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1200,99}{65,7} \cong 19 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{19} \cong 132mm$$

Portanto:

$$n = \frac{(14+19)}{2} \cong 17 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{17} \cong 147mm$$

- Adotando o conector do tipo perfil U, com espessura de 4,76mm, comprimento de 100mm e altura de 75mm.

A resistência do conector é igual a:

$$Q_{rd} = 429,32kN$$

O número de conectores de cisalhamento e o espaçamento longitudinal, para os dois trechos distintos admitindo interação total, podem ser determinados por:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1433,32}{429,32} \cong 4 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{4} \cong 625mm$$

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1774,32}{429,32} \cong 5 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{5} \cong 500mm$$

O número de conectores de cisalhamento e o espaçamento longitudinal, para os dois trechos distintos admitindo interação parcial, podem ser determinados por:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{859,99}{429,32} \cong 2 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{2} \cong 1250mm$$

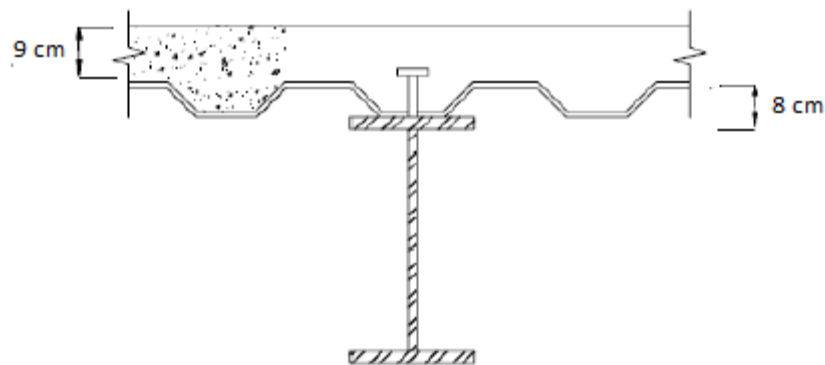
$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1200,99}{429,32} \cong 3 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{3} \cong 833mm$$

3.2. Exemplo 2:

O estudo de caso do denominado Exemplo 2 consiste no pré-dimensionamento das vigas mistas para o mesmo prédio exemplo do item 3.1. As vigas mistas são formadas por um perfil de aço laminado tipo “W” e laje mista do tipo “steel-deck” de concreto de 25 m² com espessura de 17 cm, 9 cm de concreto e 8 cm da fôrma de aço incorporada. O tipo de construção considerada foi escorada.

As ações solicitantes são as mesmas do item 3.1, portanto o momento fletor solicitante também será igual.

Figura 15 – Seção transversal – viga de aço + laje mista



Fonte: Arquivo pessoal

3.2.1. Viga mista biapojada

Uma vez obtida o momento fletor solicitante, calcula-se o momento fletor resistente do perfil adotado, seguindo as recomendações da NBR 8800. Para a viga mista biapojada o perfil adotado será W 310 x 38,7 pois atende a seguinte condição:

$$W > W_{\min} = \frac{M_{sd}}{\sigma_{adm}} = \frac{17170}{34,5} = 497,68 \text{ cm}^3$$

Dados:

a) Materiais:

- Mesmo do exemplo 1

b) Dimensões da viga de aço:

$$\begin{aligned} d &= 310 \text{ mm} & bf &= 165 \text{ mm} \\ hw &= 290,6 \text{ mm} & tf &= 9,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$t_w = 5,8 \text{ mm}$$

c) Características geométricas:

- Vigas de aço:

$$A = 49,7 \text{ cm}^2 \quad W_x = 554 \text{ cm}^3$$

$$I_x = 8581 \text{ cm}^4 \quad Z_x = 615 \text{ cm}^4$$

- Largura efetiva:

Seguindo as recomendações da NBR 8800, temos:

$$\frac{L}{8} = \frac{500}{8} = 62,5 \text{ cm}$$

- Seção homogeneizada:

Coeficiente de homogeneização:

$$n = \frac{E}{E_c} = \frac{200000}{24691} = 8,40 \quad (\text{ações de curta duração})$$

$$n = 3 * 8,40 = 25,2 \quad (\text{ações de longa duração})$$

- Momento de inércia da seção homogeneizada:

Para $n = 8,40$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{8,5x\left(\frac{62,5}{8,40}x9\right) + 32,5x49,7}{\frac{62,5}{8,40}x9 + 49,7} = 18,72 \text{ cm}$$

Momento de inércia:

$$I_{rr} = (18,72 - 8,5)^2x\left(\frac{62,5}{8,40}x9\right) + \frac{62,5}{8,40}x\frac{9^3}{12} + (32,5 - 18,72)x49,7 + 8581$$

$$I_{rr} = 25.465 \text{ cm}^4$$

Para $n = 25,2$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{8,5x\left(\frac{62,5}{25,2}x9\right) + 32,5x49,7}{\frac{62,5}{25,2}x9 + 49,7} = 25,06 \text{ cm}$$

Momento de inércia:

$$I_{rr} = (25,06 - 8,5)^2x\left(\frac{62,5}{25,2}x9\right) + \frac{62,5}{25,2}x\frac{9^3}{12} + (32,5 - 25,06)x49,7 + 8581$$

$$I_{tr} = 17.604 \text{ cm}^4$$

Cálculo do momento resistente admitindo interação total:

Inicialmente determina-se a classe da alma da viga de aço:

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{290,6}{5,8} = 50,10 < 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53 \rightarrow \text{classe 2, pois } \lambda_{pl} = 67$$

Assim, determina-se a viga “compacta”.

Determina-se a força resistente de compressão e tração, respectivamente, por:

$$C_{cd} = \frac{0,85 * f_{ck} * L_e * t_c}{\gamma_c} = \frac{0,85 * 2,5 * 62,5 * 9}{1,4} = 853,79 \text{ kN}$$

$$T_{ad} = \frac{A_a * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{49,7 * 34,5}{1,1} = 1558,77 \text{ kN}$$

Como $C_{cd} < T_{ad}$, a linha neutra plástica se encontra no perfil de aço. A força de compressão na seção de aço, C_{ad} , é então definida por:

$$C_{ad} = \frac{(1558,77 - 853,79)}{2} = 352,49 \text{ kN}$$

Profundidade da linha neutra da seção plastificada:

$$a = \frac{853,79 * 1,4}{0,85 * 2,5 * 62,5} = 9 \text{ cm}$$

E com:

$$A_{af} f_{yd} = 16,5 * 0,97 * \left(\frac{34,5}{1,1} \right) = 501,98 \text{ kN}$$

$C_{ad} < A_{af} f_{yd}$, então, tem-se que a linha neutra no perfil de aço passa pela mesa superior, a uma profundidade, medida pela face superior do perfil, igual a:

$$y_p = \frac{352,49}{501,98} * 0,97 = 0,68 \text{ cm}$$

Logo a posição do centro de gravidade da seção de aço comprimida, medida a partir da face superior do perfil é dada por:

$$y_c = \frac{0,68}{2} = 0,34 \text{ cm}$$

E a posição do centro de gravidade da seção de aço tracionada, medida a partir da face inferior do perfil é dada por:

$$y_i = \frac{0,97 * 16,5 * \frac{0,97}{2} + 0,58 * 29,1 * \left(\frac{29,1}{2} + 0,97 \right) + (0,97 - 0,68) * 16,5 * \left(\frac{(0,97 - 0,68)}{2} + 29,1 + 0,97 \right)}{0,97 * 16,5 + 0,58 * 29,1 + (0,97 - 0,68) * 16,5}$$

$$y_i = 10,99 \text{ cm}$$

O cálculo do momento resistente é dado por:

$$M_{rd} = C_{ad} (d - y_c - y_i) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_f + d - y_i \right)$$

$$M_{rd} = 352,49(31 - 0,34 - 10,99) + 853,79 \left(9 - \frac{9}{2} + 31 - 10,99 \right) = 27.861,28 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 278,61 \text{ kN.m} > M_{sd} = 171,70 \text{ kN.m (ok!)}$$

Cálculo do momento resistente admitindo-se ligação parcial:

Para calcular a resistência global da conexão aço-concreto (Q_n) utiliza-se o valor mínimo do grau de conexão dado por:

$$\eta = 1 - \frac{200000}{578 * 345} (0,75 - 0,03 * 5) = 0,60 = 60\%$$

O novo valor resultante de compressão do concreto é dado por:

$$\sum Q_d = 0,6 * 853,79 = 512,28 \text{ kN} = C_{cd}$$

A linha neutra no concreto está situada a uma profundidade igual a:

$$a = \frac{512,28}{0,85 * 2,5 * 62,5} = 3,86 \text{ cm}$$

A resultante de compressão do aço é calculada por:

$$C_{ad} = \frac{1558,77 - 512,28}{2} = 523,25 \text{ kN}$$

E com:

$$A_{af} f_{yd} = 16,5 * 0,97 * \left(\frac{34,5}{1,1} \right) = 501,98 \text{ kN}$$

$C_{ad} < A_{af} f_{yd}$, então, tem-se que a linha neutra no perfil de aço passa pela mesa superior, a uma profundidade, medida pela face superior do perfil, igual a:

$$y_p = \frac{523,25}{501,98} * 0,97 = 1,01 \text{ cm}$$

Logo a posição do centro de gravidade da seção de aço comprimida, medida a partir da face superior do perfil é dada por:

$$y_c = \frac{1,01}{2} = 0,50\text{cm}$$

E a posição do centro de gravidade da seção de aço tracionada, medida a partir da face inferior do perfil é dada por:

$$y_t = \frac{0,97 * 16,5 * \frac{0,97}{2} + 0,58 * 29,1 * \left(\frac{29,1}{2} + 0,97 \right) + (0,97 - 1,01) * 16,5 * \left(\frac{(0,97 - 1,01)}{2} + 29,1 + 0,97 \right)}{0,97 * 16,5 + 0,58 * 29,1 + (0,97 - 1,01) * 16,5}$$

$$y_t = 7,74\text{cm}$$

O cálculo do momento resistente é dado por:

$$M_{rd} = C_{ad}(d - y_c - y_t) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_f + d - y_t \right)$$

$$M_{rd} = 523,25(31 - 0,50 - 7,74) + 512,28 \left(9 - \frac{3,86}{2} + 31 - 7,74 \right) = 27.442,3\text{kN.cm}$$

$$M_{rd} = 274,42 \text{ kN.m} > M_{sd} = 171,70 \text{ kN.m (ok!)}$$

Para interação total temos:

Largura efetiva	L	cm	62,5
Coef. de homogeneização (curta duração)	n	-	8,4
Posição do centro de gravidade	ycg	cm	18,72
Momento de inércia	I	cm ⁴	25.465,00
Coef. de homogeneização (longa duração)	n	-	25,2
Posição do centro de gravidade	ycg	cm	25,06
Momento de inércia	I	cm ⁴	17.604,00
Índice de esbeltez	λ	-	50,1
Força resistente de compressão	C	kN	853,79
Força resistente de tração	T	kN	1.558,77
Profundidade da linha neutra	a	cm	9
Momento resistente de cálculo	Mrd	kN.m	278,61

Para interação parcial temos:

Grau de conexão	η	%	60
Novo resultante de compressão do concreto	Ccd	kN	512,58
Profundidade da linha neutra	a	cm	3,86
Resultante de compressão do aço	Cad	kN	523,25
Resultante de compressão do aço	Aaffyd	kN	501,98

Profundidade da linha neutra na mesa superior	yp	cm	1,01
Posição do centro de gravidade na seção de aço comprimida	yc	cm	0,5
Posição do centro de gravidade na seção de aço tracionada	yt	cm	7,74
Momento resistente de cálculo positivo	Mrd	kN.m	274,42

A Tabela 5 indica os momentos solicitantes e resistentes referentes ao pórtico de vigas simplesmente apoiadas.

Tabela 5 - Momentos fletores da viga mista biapoiada exemplo.

		Momento Solicitante (M_{sd})		Momento Resistente de Cálculo (M_{rd})	
		Momento Positivo	Momento Negativo	Momento Positivo	Momento Negativo
Viga mista biapoiada	Interação Total	171,70 kN.m	-	278,61 kN.m	-
	Interação Parcial	171,70 kN.m	-	274,42 kN.m	-

Ligação aço-concreto: conectores de cisalhamento

- Adotando o conector do tipo pino com cabeça (stud bolt) ($\varnothing 15,9\text{mm}$).

$$F_{ucs} = 41,5 \text{ MPa.}$$

Para obter a resistência individual do conector adota-se o menor dos seguintes valores:

$$Q_{rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} = \frac{0,5 * 1,98 \sqrt{2,5 * 24691}}{1,25} = 196,77 \text{ kN}$$

$$Q_{rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = \frac{0,60 * 1,98 * 41,5}{1,25} = 39,4 \text{ kN}$$

Portanto a resistência de um conector é igual a 39,4 kN.

O número de conectores para a ligação total é igual a:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{853,79}{39,4} \cong 22 \text{ conectores}$$

O espaçamento longitudinal entre os conectores é igual a:

$$e = \frac{2500}{22} \cong 114 \text{ mm}$$

Os espaçamentos mínimos e máximos, respectivamente, recomendado pela NBR 8800 são:

$$e_{\max} = 915\text{mm}$$

$$e_{\min} = 4 * 15,9 = 63,6\text{mm}$$

Portanto, os critérios de espaçamento estão satisfeitos.

O número de conectores para a ligação parcial é igual a:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{512,28}{39,4} \cong 13 \text{ conectores}$$

O espaçamento longitudinal entre os conectores é igual a:

$$e = \frac{2500}{13} \cong 193\text{mm}$$

- Adotando o conector do tipo perfil U, com espessura de 4,76mm, comprimento de 100mm e altura de 75mm.

A resistência do conector é dada por:

$$Q_{rd} = \frac{0,3(t_{fcs} + 0,5 * t_{wcs}) * L_{cs} * \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} = \frac{0,3(0,48 + 0,5 * 0,48) * 10 * \sqrt{2,5 * 24691}}{1,25}$$

$$Q_{rd} = 429,32\text{kN}$$

O número de conectores para a ligação total é igual a:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{853,79}{429,32} \cong 2 \text{ conectores}$$

O espaçamento longitudinal entre os conectores é igual a:

$$e = \frac{2500}{2} \cong 1250\text{mm}$$

O espaçamento mínimo para o conector perfil U, recomendado pela NBR 8800, será o maior dos seguintes valores:

$$e = 4 * 100 = 400\text{mm}$$

$$e = 4 * 75 = 300\text{mm}$$

Portanto o espaçamento mínimo entre os conectores foi atendido.

O número de conectores para a ligação parcial é igual a:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{512,28}{429,32} \cong 2 \text{ conectores}$$

O espaçamento longitudinal entre os conectores é igual a:

$$e = \frac{2500}{2} \cong 1250 \text{ mm}$$

3.2.2. Viga mista contínua

O maior momento fletor solicitante, no caso da viga mista contínua, é o momento fletor negativo que se encontra na região dos apoios. Para a viga mista contínua perfil adotado será W 200 x 35,9, pois, atende a seguinte condição:

$$W > W_{\min} = \frac{M_{sd}}{\sigma_{adm}} = \frac{11550}{34,5} = 334,78 \text{ cm}^3$$

Dados:

a) Materiais:

- O mesmo do exemplo 1.

b) Dimensões da viga de aço:

$$\begin{aligned} d &= 201 \text{ mm} & bf &= 165 \text{ mm} \\ hw &= 181 \text{ mm} & tf &= 10,2 \text{ mm} \\ tw &= 6,2 \text{ mm} \end{aligned}$$

c) Características geométricas:

- Vigas de aço:

$$\begin{aligned} A &= 45,7 \text{ cm}^2 & W_x &= 342 \text{ cm}^3 \\ I_x &= 3437 \text{ cm}^4 & Z_x &= 380 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

d) Armadura longitudinal:

$$\begin{aligned} F_{sy} &= 500 \text{ MPa} \\ A_s &= 7,85 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Diâmetro das barras: 10 mm.

Distância do centro de gravidade das barras à face superior da laje: 30 mm.

- Largura efetiva:

$$b = 0,125L = 62,5 \text{ cm (na região do apoio interno)}$$

$$b = 0,200L = 100 \text{ cm (na metade do vão da viga)}$$

- Seção homogeneizada:

Seção “não fissurada”

Para $n=8,40$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 * 7,85 + 8,5x \left(\frac{62,5}{8,40} x9 \right) + 32,5x45,7}{7,85 + \frac{62,5}{8,40} x9 + 45,7} = 17,24cm$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (17,24 - 3)^2 * 7,85 + (17,24 - 8,5)^2 x \left(\frac{62,5}{8,40} x9 \right) + \frac{62,5}{8,40} x \frac{9^3}{12} + (32,5 - 17,24)x45,7 + 3437$$

$$I_{tr} = 24583,90cm^4$$

Para $n=25,2$

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 * 7,85 + 8,5x \left(\frac{62,5}{25,2} x9 \right) + 32,5x45,7}{7,85 + \frac{62,5}{25,2} x9 + 45,7} = 22,39cm$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (22,39 - 3)^2 * 7,85 + (22,39 - 8,5)^2 x \left(\frac{62,5}{25,2} x9 \right) + \frac{62,5}{25,2} x \frac{9^3}{12} + (32,5 - 22,39)x45,7 + 3437$$

$$I_{tr} = 17206,06cm^4$$

Seção “fissurada”:

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 * 7,85 + 32,5x45,7}{7,85 + 45,7} = 28,18cm$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (28,18 - 3)^2 * 7,85 + (32,5 - 28,18)x45,7 + 3437 = 9267,02cm^4$$

Seção na metade do vão: (b=100cm)

Para n=8,40

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 \cdot 7,85 + 8,5x \left(\frac{100}{8,40} x^9 \right) + 32,5x45,7}{7,85 + \frac{100}{8,40} x^9 + 45,7} = 13,39cm$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (13,39 - 3)^2 \cdot 7,85 + (13,39 - 8,5)^2 x \left(\frac{100}{8,40} x^9 \right) + \frac{100}{8,40} x \frac{9^3}{12} + (32,5 - 13,39)x45,7 + 3437$$

$$I_{tr} = 27548,21cm^4$$

Para n=25,2

Posição do centro de gravidade (y_{cg}), medido a partir do topo da laje:

$$y_{cg} = \frac{3 \cdot 7,85 + 8,5x \left(\frac{100}{25,2} x^9 \right) + 32,5x45,7}{7,85 + \frac{100}{25,2} x^9 + 45,7} = 19,30cm$$

Momento de inércia:

$$I_{tr} = (19,30 - 3)^2 \cdot 7,85 + (19,30 - 8,5)^2 x \left(\frac{100}{25,2} x^9 \right) + \frac{100}{25,2} x \frac{9^3}{12} + (32,5 - 19,30)x45,7 + 3437$$

$$I_{tr} = 20044,01cm^4$$

Tabela 6 - Momentos de inércia da seção homogeneizada.

Tipo da ação	N	Seção dos apoios		Seção na metade do vão
		"não fissurada"	"fissurada"	
Curta duração (variável)	8,40	24.583,89 cm ⁴	9.267,02 cm ⁴	27.548,21 cm ⁴
Longa duração (permanente)	25,2	17.206,06 cm ⁴	9.267,02 cm ⁴	20.044,01 cm ⁴

Cálculo do momento resistente negativo admitindo interação total:

$$R_s = \frac{7,85 \times 50}{1,15} = 341 \text{ kN}$$

$$R_w = \frac{18,1 \times 0,62 \times 34,5}{1,1} = 351,96 \text{ kN}$$

Como: $R_s < R_w$, a linha neutra intercepta a alma.

O momento resistente de cálculo é igual a:

$$M_{rd} = (M_{pl,Rd})_a + R_s \left(\frac{d}{2} + h_s \right) - \frac{R_s^2}{R_w} \frac{h_w}{4}$$

$$(M_{pl,Rd})_a = \frac{380 \times 34,5}{1,1} = 11.918,18 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 11.918,18 + 341 \left(\frac{20,1}{2} + 14 \right) - \frac{341^2}{351,96} \frac{18,1}{4} = 18.628,92 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 186,29 \text{ kN.m} > M_{sd} = 115,50 \text{ kN.m (ok!)}$$

Cálculo do momento resistente negativo admitindo interação parcial:

$$R_s = \frac{7,85 \times 50}{1,15} = 341 \text{ kN}$$

$$R_w = \frac{18,1 \times 0,62 \times 34,5}{1,1} = 351,96 \text{ kN}$$

Como: $R_s < R_w$, a linha neutra intercepta a alma.

O momento resistente de cálculo é igual a:

$$M_{rd} = (M_{pl,Rd})_a + R_s \left(\frac{d}{2} + h_s \right) - \frac{R_s^2}{R_w} \frac{h_w}{4}$$

$$(M_{pl,Rd})_a = 0,6 \times \left(\frac{380 \times 34,5}{1,1} \right) = 7150,91 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 7150,91 + 341 \left(\frac{20,1}{2} + 14 \right) - \frac{341^2}{351,96} \frac{18,1}{4} = 13.861,65 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 138,62 \text{ kN.m} > M_{sd} = 115,50 \text{ kN.m (ok!)}$$

Cálculo do momento resistente positivo admitindo interação total:

Inicialmente determina-se a classe da alma da viga de aço:

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{181}{6,2} = 29,19 < 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53 \rightarrow \text{classe 2, pois } \lambda_{pl} = 67$$

Assim, determina-se a viga “compacta”.

$$C_{cd} = \frac{0,85 * f_{ck} * L_e * t_c}{\gamma_c} = \frac{0,85 * 2,5 * 100 * 9}{1,4} = 1366,10 \text{ kN}$$

$$T_{ad} = \frac{A_a * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{45,7 * 34,5}{1,1} = 1433,32 \text{ kN}$$

Como $C_{cd} < T_{ad}$, a linha neutra plástica se encontra no perfil de aço.

Profundidade da linha neutra da seção plastificada:

$$a = \frac{1366,10 * 1,4}{0,85 * 2,5 * 100} = 9 \text{ cm}$$

A resultante de compressão do aço é calculada por:

$$C_{ad} = \frac{1433,32 - 1366,10}{2} = 33,61 \text{ kN}$$

E com:

$$A_{af} f_{yd} = 16,5 * 1,02 * \left(\frac{34,5}{1,1} \right) = 527,85 \text{ kN}$$

$C_{ad} < A_{af} f_{yd}$, então, tem-se que a linha neutra no perfil de aço passa pela mesa superior, a uma profundidade, medida pela face superior do perfil, igual a:

$$y_p = \frac{33,61}{527,85} * 1,02 = 0,065 \text{ cm}$$

Logo, a posição do centro de gravidade da seção de aço comprimida, medida a partir da face superior do perfil é dada por:

$$y_c = \frac{0,065}{2} = 0,032 \text{ cm}$$

E a posição do centro de gravidade da seção de aço tracionada, medida a partir da face inferior do perfil, é dada por:

$$y_t = \frac{1,02 * 16,5 * \frac{1,02}{2} + 0,62 * 18,1 * \left(\frac{18,1}{2} + 1,02 \right) + (1,02 - 0,065) * 16,5 * \left(\frac{(1,02 - 0,065)}{2} + 18,1 + 1,02 \right)}{1,02 * 16,5 + 0,62 * 18,1 + (1,02 - 0,065) * 16,5}$$

$$y_t = 9,82 \text{ cm}$$

O cálculo do momento resistente é dado por:

$$M_{rd} = C_{ad}(d - y_c - y_t) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_f + d - y_t \right)$$

$$M_{rd} = 33,62(20,1 - 0,032 - 9,82) + 1366,10 \left(9 - \frac{9}{2} + 20,1 - 9,82 \right) = 20.535,5 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = 205,35 \text{ kN.m} > M_{sd} = 57,70 \text{ kN.m (ok!)}$$

Cálculo do momento resistente positivo admitindo-se ligação parcial:

O novo valor resultante de compressão do concreto é dado por:

$$\sum Q_d = 0,6 * 1366,10 = 819,64 \text{ kN} = C_{cd}$$

A linha neutra no concreto está situada a uma profundidade igual a:

$$a = \frac{819,64}{0,85 * 2,5 * 100} = 3,86 \text{ cm}$$

A resultante de compressão do aço é calculada por:

$$C_{ad} = \frac{1433,32 - 819,64}{2} = 306,84 \text{ kN}$$

E com:

$$A_{af} f_{yd} = 16,5 * 1,02 * \left(\frac{34,5}{1,1} \right) = 527,85 \text{ kN}$$

$C_{ad} < A_{af} f_{yd}$, então, tem-se que a linha neutra no perfil de aço passa pela mesa superior, a uma profundidade, medida pela face superior do perfil, igual a:

$$y_p = \frac{306,84}{527,85} * 1,02 = 0,59 \text{ cm}$$

Logo, a posição do centro de gravidade da seção de aço comprimida, medida a partir da face superior do perfil é dada por:

$$y_c = \frac{0,59}{2} = 0,30 \text{ cm}$$

E a posição do centro de gravidade da seção de aço tracionada, medida a partir da face inferior do perfil, é dada por:

$$y_t = \frac{1,02 * 16,5 * \frac{1,02}{2} + 0,62 * 18,1 * \left(\frac{18,1}{2} + 1,02 \right) + (1,02 - 0,59) * 16,5 * \left(\frac{(1,02 - 0,59)}{2} + 18,1 + 1,02 \right)}{1,02 * 16,5 + 0,62 * 18,1 + (1,02 - 0,59) * 16,5}$$

$$y_t = 7,35 \text{ cm}$$

O cálculo do momento resistente é dado por:

$$M_{rd} = C_{ad}(d - y_c - y_t) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_f + d - y_t \right)$$

$$M_{rd} = 306,84(20,1 - 0,30 - 7,35) + 819,64 \left(9 - \frac{3,86}{2} + 20,1 - 7,35 \right) = 20.065,4 \text{ kN.m}$$

$$M_{rd} = 200,65 \text{ kN.m} > M_{sd} = 57,70 \text{ kN.m (ok!)}$$

Para interação total temos:

Largura efetiva (na região do apoio interno)	L	cm	62,5
Força resistente transversal da armadura	Rs	kN	341
Força resistente transversal da alma	Rw	kN	351,96
Momento resistente de cálculo negativo	Mrd	kN.m	186,29
Largura efetiva (na metade do vão da viga)	L	cm	100
Índice de esbeltez	l	-	29,19
Força resistente de compressão	C	kN	1.366,10
Força resistente de tração	T	kN	1.433,32
Profundidade da linha neutra	a	cm	9
Momento resistente de cálculo positivo	Mrd	kN.m	205,35

Para interação parcial temos:

Grau de conexão	h	%	60
Momento resistente de cálculo negativo	Mrd	kN.m	138,62
Novo resultante de compressão do concreto	Ccd	kN	819,64
Profundidade da linha neutra	a	cm	3,86
Resultante de compressão do aço	Cad	kN	306,84
Resultante de compressão do aço	Aaffyd	kN	527,85
Profundidade da linha neutra na mesa superior	yp	cm	0,59
Posição do centro de gravidade na seção de aço comprimida	yc	cm	0,3
Posição do centro de gravidade na seção de aço tracionada	yt	cm	7,35
Momento resistente de cálculo positivo	Mrd	kN.m	200,65

A Tabela 7 indica os momentos solicitantes e resistentes referentes ao pórtico de vigas mistas contínuas.

Tabela 7 - Momentos fletores da viga mista contínua exemplo.

		Momento Solicitante (M_{sd})		Momento Resistente de Cálculo (M_{rd})	
		Momento Positivo	Momento Negativo	Momento Positivo	Momento Negativo
Viga mista contínua	Interação Total	57,70 kN.m	115,50 kN.m	205,35 kN.m	186,29 kN.m
	Interação Parcial	57,70 kN.m	115,50 kN.m	200,65 kN.m	138,62 kN.m

Ligação aço-concreto – conectores de cisalhamento:

Para a determinação da resistência da ligação, é necessário analisar dois trechos da viga.

O trecho entre o apoio externo e o máximo momento positivo:

$$\sum Q_{rd} = \min(imo(T_{ad}, C_{cd})) = 1366,10kN$$

E o trecho entre a seção do máximo momento positivo até o máximo momento negativo (região dos apoios):

$$\sum Q_{rd} = \min(imo(T_{ad}, C_{cd})) + R_s = 1366,10 + 341 = 1707,1kN$$

- Adotando o conector do tipo pino com cabeça (stud bolt) ($\varnothing 15,9mm$; $f_{ucs}=41,5MPa$ tem-se:

$$Q_{rd} = 39,4kN$$

O número de conectores de cisalhamento e o espaçamento longitudinal, para os dois trechos distintos admitindo interação total, podem ser determinados por:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1366,10}{39,4} \cong 35 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{35} \cong 72mm$$

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1707,10}{39,4} \cong 44 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{44} \cong 57mm$$

Portanto:

$$n = \frac{(35 + 44)}{2} \cong 40 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{40} \cong 63mm$$

O número de conectores de cisalhamento e o espaçamento longitudinal, para os dois trechos distintos admitindo interação parcial, podem ser determinados por:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{819,64}{39,4} \cong 21 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{21} \cong 119mm$$

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1160,64}{39,4} \cong 30 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{30} \cong 84mm$$

Portanto:

$$n = \frac{(21 + 30)}{2} \cong 26 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{26} \cong 97mm$$

- Adotando o conector do tipo perfil U, com espessura de 4,76mm, comprimento de 100mm e altura de 75mm.

A resistência do conector é igual a:

$$Q_{rd} = 429,32kN$$

O número de conectores de cisalhamento e o espaçamento longitudinal, para os dois trechos distintos admitindo interação total, podem ser determinados por:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1366,10}{429,32} \cong 4 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{4} \cong 625mm$$

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1707,10}{429,32} \cong 4 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{4} \cong 625mm$$

O número de conectores de cisalhamento e o espaçamento longitudinal, para os dois trechos distintos admitindo interação parcial, podem ser determinados por:

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{819,64}{429,32} \cong 2 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{2} \cong 1250mm$$

$$n = \frac{\sum Q_d}{Q_{rd}} = \frac{1160,64}{429,32} \cong 3 \text{ conectores} ; e = \frac{2500}{3} \cong 833mm$$

4. Análise dos Resultados

Os perfis adotados para a viga mista atendem os requisitos de dimensionamento considerando a viga de aço isolada para o cálculo do momento resistente. Por serem dimensionadas de acordo com a teoria de vigas mistas, ou seja, com a contribuição da laje de concreto, o momento resistente é maior que o considerado para uma viga puramente de aço (Tabela 8).

No presente estudo foi observado um ganho de 44% no momento resistente de cálculo utilizando o mesmo perfil de aço com laje maciça, e 25% de ganho na resistência utilizando o mesmo perfil de aço com a laje mista. O ganho de resistência é menor no caso de laje mista, pois a espessura da parte maciça de concreto na laje diminui para conformação da fôrma de aço incorporada.

O aumento de resistência é uma das vantagens do uso de vigas mistas. Um perfil de menor peso poderia ter sido usado na situação de viga mista para atingir o momento resistente necessário e ainda reforçar a vantagem da economia.

Tabela 8 - Comparação de momentos máximos resistentes para o perfil W 310 x 38,7 – vigas biapoiadas.

Máximo Momento Resistente de Cálculo (M_{rd})		Diferença(%)
Viga de aço isolada	Viga mista + Laje maciça	
210,21 kN.m	378,54 kN.m	44%
Máximo Momento Resistente de Cálculo (M_{rd})		Diferença(%)
Viga de aço isolada	Viga mista + Laje mista	
210,21 kN.m	278,61 kN.m	25%

No caso de vigas mistas contínuas, foi utilizado um perfil de menor peso. O momento solicitante máximo se divide em positivo e negativo, sendo o momento solicitante negativo maior em módulo.

Para a viga mista biapoiada utilizou-se o perfil W 310 x 38,7, enquanto para a viga mista contínua utilizou-se o perfil W 200 x 35,9, o que representa uma redução no peso da viga na ordem de 7,24% (Tabela 9). Entretanto, o maior ganho no caso das vigas adotadas nesta comparação está na redução de sua altura (de 310mm para 200mm), o que permite um significativo ganho de vão livre no pavimento tipo.

Tabela 9 - Comparação do peso dos perfis

Peso do perfil (cm ³)		Dif.(%)
Viga mista biapoiada	Viga mista contínua	
W 310 x 38,7kgf/m – $W_x=554$ cm ³	W 200 x 35,9 kgf/m – $W_x=342$ cm ³	7,24%

Considerando um perfil de mesma classe para vigas mistas contínuas (altura de 310mm), poderia ser adotado um perfil de menor peso W 310 x 28,3 kgf/m considerando o critério de mínimo módulo elástico (Tabela 10), resultando numa diminuição no peso deste elemento em 26,87%.

Tabela 10 - Comparação do peso dos perfis

Peso do perfil (cm ³)		Dif.(%)
Viga mista biapoiada	Viga mista contínua	
W 310 x 38,7kgf/m – $W_x=554$ cm ³	W 310 x 28,3 kgf/m – $W_x=356$ cm ³	26,87%

No caso da viga biapoiada com laje maciça, em uma situação de interação completa entre a viga de aço e a laje de concreto, a linha neutra plástica encontra-se na laje de concreto, isso permite que a força de compressão seja resistida pela laje, explorando a eficiência total do sistema misto.

Quando se admitiu a interação parcial, o grau de conexão mínimo permitiu obter um momento resistente maior que o momento solicitante. Quando há ligação parcial a viga de aço e a laje apresentam-se duas linhas neutras: uma na laje e outra no perfil de aço, e foi preciso verificar se a linha neutra do perfil de aço encontra-se na mesa ou na alma, pois irá definir o cálculo da profundidade da linha neutra.

Quando as vigas mistas contínuas foram analisadas, foi preciso considerar a armadura longitudinal da laje devido à presença do momento negativo no sistema. O momento fletor positivo quando analisado pela interação completa obteve sua linha neutra na laje de concreto, já o momento negativo apresentou a linha neutra na alma do perfil o que prejudica o sistema misto, com um momento resistente bem menor.

A análise da interação parcial em regiões de momentos negativos foi possível porque o perfil se enquadra na classe 2. Em ambos os casos de viga mista biapoiada e contínua com laje mista, admitindo interação total, a linha neutra se encontrou na alma do perfil de aço.

O mesmo edifício exemplo foi usado em ambas situações (lajes maciças e mista) para vigas biapoiadas e contínuas, por permitir uma comparação direta nos resultados obtidos. Percebe-se que devido à fissuração do concreto e da instabilidade do perfil de aço, em regiões de momentos negativos a resistência de cálculo ao momento fletor é menor que em regiões de momentos positivos.

As Tabelas 11 e 12 indicam os resultados obtidos considerando um sistema misto com laje maciça (Exemplo 1) e laje mista steel deck (Exemplo 2), respectivamente.

Tabela 11 - Comparação dos momentos resistentes para vigas mistas biapoiadas com laje maciça e com laje mista.

		Momento Solicitante (M_{sd})	Momento Resistente de Cálculo (M_{rd})
		Momento Positivo	Momento Positivo
Viga mista biapoiada + laje maciça	Interação Total	173,20 kN.m	378,54 kN.m
	Interação Parcial	173,20 kN.m	366,59 kN.m
Viga mista biapoiada + laje mista	Interação Total	173,20 kN.m	278,61 kN.m
	Interação Parcial	173,20 kN.m	274,42 kN.m

Tabela 12 - Comparação dos momentos resistentes para vigas mistas contínuas com laje maciça e com laje mista.

		Momento Solicitante (M_{sd})		Momento Resistente de Cálculo (M_{rd})	
		Momento Positivo	Momento Negativo	Momento Positivo	Momento Negativo
Viga mista contínua + laje maciça	Interação Total	57,70 kN.m	115,50 kN.m	320,06 kN.m	186,29 kN.m
	Interação Parcial	57,70 kN.m	115,50 kN.m	271,43 kN.m	138,62 kN.m
Viga mista contínua + laje mista	Interação Total	57,70 kN.m	115,50 kN.m	205,35 kN.m	186,29 kN.m
	Interação Parcial	57,70 kN.m	115,50 kN.m	200,65 kN.m	138,62 kN.m

O número de conectores de cisalhamento foi dimensionado para que o somatório de resistência a cisalhamento seja igual ao menor valor entre a força de compressão e tração.

O conector do tipo perfil "U" possui uma resistência individual bem maior (Tabela 13 e 14), aumentando o espaçamento e diminuindo sua quantidade necessária. No caso do conector pino com cabeça para laje mista, sua resistência diminui porque foi considerado o coeficiente para a consideração da posição do conector a favor da segurança. Enquanto que para laje maciça este coeficiente é igual a 1 porque os conectores são soldados diretamente no perfil.

Tabela 13 - Resistência dos conectores.

	Resistência do conector (Q_{rd})	
	Pino com cabeça (stud bolt)	Perfil "U"
Viga mista contínua + laje maciça	65,7 kN	429,32 kN
Viga mista contínua + laje mista	39,4 kN	429,32 kN

Tabela 14 - Número de conectores.

		Número de conectores (n)	
		Pino com cabeça (stud bolt)	Perfil "U"
Viga mista biapoiada + laje maciça	Interação Total	24	4
	Interação Parcial	15	3
Viga mista contínua + laje maciça	Interação Total	25	5
	Interação Parcial	17	3
Viga mista biapoiada + laje mista	Interação Total	22	2
	Interação Parcial	13	2
Viga mista contínua + laje mista	Interação Total	40	4
	Interação Parcial	26	3

As fórmulas de pré-dimensionamento para o cálculo de vigas e espessura da laje permitem uma análise aproximada do comportamento estrutural, podendo-se obter resultados conservadores em alguns casos, uma vez que tal metodologia não considera o carregamento das estruturas como critério de dimensionamento dos elementos estruturais.

No estudo de caso apresentado neste trabalho, a menor diferença entre a resistência e solicitação de cálculo foi obtido para a situação de viga mista contínua com laje steel deck.

5. Conclusões

A proposta deste trabalho buscou pesquisar aspectos qualitativos e quantitativos de vigas mistas aço concreto, considerando critérios de pré-dimensionamento dos elementos estruturais (vigas e lajes). O estudo teórico abordou os principais conceitos que compõem e influenciam o comportamento das vigas mistas e que devem ser analisados na fase de projeto. A avaliação teórica da influência do grau de interação, os perfis adotados, o tipo de laje e a influência do processo construtivo permite um melhor entendimento quando no dimensionamento de uma viga mista.

Na apresentação do primeiro exemplo do estudo de caso, obteve-se o dimensionamento de uma viga mista a partir de um pórtico estrutural para duas situações diferentes, na primeira situação a viga utilizada foi simplesmente apoiada, que trabalhava de forma conjunta com uma laje maciça. Na segunda situação trabalhou-se com viga contínua de pórtico. Os resultados obtidos mostraram a eficiência da laje maciça sob uma viga mista simplesmente apoiada.

A viga mista contínua mostrou uma perda de eficiência do sistema misto na presença de momentos fletores negativos, mas por ter momento solicitante menor foi possível utilizar um perfil de menor peso na viga. O segundo exemplo manteve as mesmas duas situações, porém com laje mista (steel deck).

Tanto a localização quanto o espaçamento influenciam na resistência de conexão de cisalhamento de uma viga mista. Foi analisada também a resistência do conector ao fluxo cisalhante, para o conector tipo pino com cabeça e em perfil U.

O perfil U apresentou maior resistência para conector de cisalhamento, no caso da viga com um vão de 5m o perfil U seria mais adequado por poder atingir a resistência necessária com um menor número de conectores.

No caso de laje maciça, foi obtido um número de conectores adequados para a resistência do esforço solicitante, mas considerando laje mista, com a redução da resistência individual do conector, o acréscimo no número de conectores do tipo pino com cabeça necessário para a resistência do esforço solicitante foi de até 60%.

Verificou-se o espaçamento máximo e mínimo entre os conectores, de acordo com os limites da NBR 8800/2008, para comprovar que os espaçamentos encontrados e adotados se enquadravam nas recomendações normativas.

O estudo proposto neste trabalho permitiu um conhecimento geral do sistema viga mista aço-concreto e acentuou bem a percepção de onde estão suas vantagens em termos de escolha deste sistema, do tipo de laje adotada, do tipo de ligação e tipo de construção.

A consideração da metodologia de pré-dimensionamento estrutural permite um estudo comparativo do comportamento das vigas mistas aço-concreto, de forma a possibilitar uma tomada de decisão básica no que se refere a partido de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA, G.M.S. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mistas aço-concreto.** 277p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2008.

DAVID, D. L. **Vigas mistas com laje treliçada e perfis formados a frio: análise do comportamento estrutural.** 218 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

DAVID, D. L. **Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas.** 250 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

BESSA, W.O. **Análise experimental e numérica de ligações viga mista-pilar com cantoneiras de alma e assento- pavimento-tipo e ligações isoladas.** 266p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

FABRIZZI, M. A. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos de aço-concreto.** 233 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FIGUEIREDO, L. M. B. **Ligações mistas aço concreto – Análise teórica e experimental.** 215p .Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

FUZHARA, M. A. L. S. **Ligações e armaduras de lajes em vigas mistas de aço e de concreto.** 149 p .Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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

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

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

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R.J. Elementos das estruturas mistas aço-concreto. Editora O Lutador. Belo Horizonte, 332p, 2001.

SÀLES, J.J. Estudo do projeto e construção de edifícios de andares múltiplos com estruturas de aço. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1995.

TRISTÃO, G.A. Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica. São Carlos. (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2002.