

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

PATRÍCIA SILVEIRA DE FREITAS

MATRÍCULA: 2096157/6

**EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS ESTRUTURADOS EM
ELEMENTOS MISTOS AÇO-CONCRETO-
ASPECTOS NORMATIVOS, ESTUDO DE CASO E ANÁLISE
COMPARATIVA**

Brasília
2014

PATRÍCIA SILVEIRA DE FREITAS

**EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS ESTRUTURADOS EM
ELEMENTOS MISTOS AÇO-CONCRETO-
ASPECTOS NORMATIVOS, ESTUDO DE CASO E ANÁLISE
COMPARATIVA**

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

Orientador: William Oliveira Bessa

Brasília
2014

PATRÍCIA SILVEIRA DE FREITAS

**EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS ESTRUTURADOS EM
ELEMENTOS MISTOS AÇO-CONCRETO -
ASPECTOS NORMATIVOS, ESTUDO DE CASO E ANÁLISE
COMPARATIVA**

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

Orientador: William Oliveira Bessa

Brasília, 04 de junho de 2014

Banca Examinadora

Eng^a. Civil: William Oliveira Bessa, D.Sc
Orientador

Eng.^o Civil: Jorge Antônio da Cunha Oliveira, D.Sc
Examinado Interno

Eng.^o Civil: Leonardo Cochrane Santiago Sampaio, M.Sc
Examinado Externo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pelo dom da vida e por todas as oportunidades que Ele me proporcionou.

Ao meu orientador de iniciação científica e TCC, Prof. William Oliveira Bessa pela orientação, disponibilidade, paciência, e preocupação que me inspiram a continuar a busca pelo conhecimento mais profundo na engenharia.

Aos meus professores de graduação, em especial à Professora Neusa e ao Professor Jairo, pela amizade e ensinamentos outorgados dentro e fora da sala de aula.

Aos meu pais, Paulo e Lúcia, pelo amor irrestrito e incondicional. Obrigado por sempre me incentivarem a contínua busca pelo saber e me apoiarem em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos, Felipe e Paulo, que são os melhores amigos e irmãos que Deus poderia me dar.

Ao meu namorado Vinícius pelo amor, carinho, incentivo, companheirismo e alegria vivida desde o momento em que nos conhecemos.

As minhas melhores amigas que são como irmãs, sempre presentes e me apoiando nas melhores e piores fases da minha vida.

As amizades conquistadas em sala de aula, enfatizando eles: Raíra, Guilherme, Filipe, Gabriel e Roger. Obrigado pelo apoio durante todo o período de graduação.

RESUMO

FREITAS, P. S. **Edifícios de múltiplos pavimentos estruturados em elementos mistos aço-concreto - Aspectos normativos, estudo de caso e análise comparativa.** Brasília. 82p. Trabalho de conclusão de curso - Centro Universitário de Brasília, UniCEUB, 2014.

A engenharia civil, assim como todas as engenharias, passa por transformações e melhorias constantes, resultado dos avanços de pesquisas científicas. Com isso, é possível otimizar a execução de projetos que no passado se qualificavam como inviáveis. Neste trabalho é abordado um método construtivo cada vez mais utilizado no Brasil e considerado inovador na construção civil, o sistema estrutural misto aço-concreto, normatizado pela NBR 8800:2008 – “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”. A pesquisa possui sua metodologia voltada para a observação teórica e apresentação dos cálculos para o dimensionamento de elementos estruturais tais como vigas, lajes e pilares, quando o aço e o concreto trabalham de forma conjunta. Esses materiais quando conectados de forma apropriada atuam na estrutura como um só elemento, somando suas principais vantagens. Para a melhor compreensão do exposto, foi realizado o estudo de caso de uma edificação de 3 (três) pavimentos, na qual se considerou apenas os carregamentos verticais e utilizou o software Ftool como ferramenta de auxílio para cálculo dos esforços. A análise comparativa do trabalho considerou o comportamento do pórtico principal em três alternativas de método construtivo, em aço, concreto armado e misto aço-concreto. Também foi realizado um levantamento de custos considerando o pré-dimensionamento do pórtico principal em face dos materiais utilizados para cada um dos métodos construtivos. O sistema misto aço-concreto apresentou o menor preço comparado com os outros tipos de sistemas estruturais. Além de ter sido a solução mais econômica para o edifício-exemplo estudado, esse método proporciona várias vantagens construtivas em relação aos outros.

Palavras-chave: *Sistema misto aço-concreto, Vigas mistas, Lajes mistas, Pilares mistos, Conectores de cisalhamento.*

ABSTRACT

FREITAS, P. S. **Buildings multiple decks structured in composite elements of steel and concrete -- Normative aspects, case study and comparative analysis** . Brasília. 82p. Completion of course work - University Center of Brasilia, UniCEUB, 2014.

The civil engineering as well as all engineering, go through constants improvements and changes, a result of advances in scientific researches. This makes it possible to optimize the execution of projects that in the past were qualified as unviable. This research approaches an increasingly constructive method used in Brazil and considered innovative in construction, the composite structures of steel and concrete, regulated by the Brazilian code NBR 8800:2008 - "*Design of steel and composite structures for building*". The scientific study has focused its methodology on the theoretical observation and exposition of the calculus for design of structural elements such as beams, slabs and columns, when the steel and the concrete work together. These materials when connected appropriately act on the structure as a single element, adding its main advantages. For better understanding of the exposed, it was performed a case report of a building of three (3) floors, which was considered only the vertical loads and for assistance it was used the software Ftool as a tool for the stress calculations. Also a survey was conducted to estimate costs considering the pre-design of the main portico of the materials used for each of the construction methods. The steel-concrete hybrid system showed the lowest cost compared to the others types of structural system (steel and structural concrete). Besides being the most economical solution for the case study, this method provides several advantages compared to the others.

Keywords: *Steel-concrete hybrid system, Composite beams, composite slabs, shear connectors.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - The Shard (2012), Londres	21
Figura 2- Edifício Casa do Comércio da Bahia – Salvador	23
Figura 3 - Principais tipos de vigas mistas.....	26
Figura 4 - Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas	27
Figura 5 – Comportamento de conectores rígidos e flexíveis	29
Figura 6 – Tipos usuais de conectores de cisalhamento	30
Figura 7 – Conector de cisalhamento tipo pino com cabeça (stud bolt)	31
Figura 8 – Comportamento dos conectores ao longo da viga mista	31
Figura 9 – Laje mista aço-concreto tipo “ <i>steel deck</i> ”	32
Figura 10 - Principais tipos de lajes mistas.....	33
Figura 11 – Tipos de pilares mistos	36
Figura 12 – Comportamento estrutural dos pilares preenchidos por concreto	37
Figura 13 - Distribuição das tensões longitudinais na laje - efeito “shearlag”. 44	
Figura 14 – Pontos de momento nulo em uma viga contínua ou semi contínua	45
Figura 15 – Distribuição de tensões em vigas mistas com interação parcial de alma cheia sob momento positivo ($h / t_w \leq 3,76 E / f_y$).....	47
Figura 16 – Distribuição de tensões para momento fletor negativo	49
Figura 17 – Lajes de concreto com fôrma de aço incorporada.....	50
Figura 18 - Ilustração do valor a ser tomado para e_{mh}	52
Figura 19 – Modos de colapso no estado limite último da laje mista de aço e concreto.....	54
Figura 20 - Distribuição de tensões para momento positivo – linha neutra plástica acima da fôrma metálica	55

Figura 21 – Distribuição de tensões para momento positivo – linha neutra plástica na fôrma metálica.....	55
Figura 22 – Planta baixa do pavimento tipo.....	60
Figura 23 – Cortes do edifício exemplo	60
Figura 24 – área de influência do carregamento distribuído para cada laje....	62
Figura 25 – Carregamento distribuído para o pórtico principal da edificação .	63
Figura 26 – Diagrama do esforço normal (DEN).....	63
Figura 27 – Diagrama do esforço cortante (DEC).....	64
Figura 28 – Diagrama do momento fletor (DMF)	64
Figura 29 – Comparação do consumo de concreto	72
Figura 30 – Comparação do consumo de aço em forma de barras.....	73
Figura 31 – Comparação do consumo de aço em forma de perfis	74
Figura 32 – Comparação do custo total das alternativas estruturais	75
Figura 33 – Seção transversal da viga mista V1.....	87
Figura 34 – Seção da laje mista	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações de vigas mistas de alma cheia biapoiadas.....	41
Tabela 2– Dimensionamento dos elementos estruturais	65
Tabela 3 – Consumo de materiais – Estrutura em concreto armado.....	66
Tabela 4 – Consumo de materiais – Estrutura metálica	67
Tabela 5 – Consumo de materiais – Estrutura mista aço-concreto	67
Tabela 6 – Planilha Orçamentária – Estrutura em concreto armado	69
Tabela 7 – Planilha Orçamentária – Estrutura metálica.....	70
Tabela 8 – Planilha Orçamentária – Estrutura mista aço-concreto.....	71
Tabela 9 – Diferença percentual para cada sistema.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A_{at}	Área tracionada da seção do perfil de aço
A_{ac}	Área comprimida da seção do perfil de aço
A_a	Área do perfil de aço
A_{cs}	Área da seção transversal do conector
A_{af}	Área da mesa superior do perfil de aço
$A_{F,ef}$	Área da seção efetiva da fôrma (correspondente a 1000 mm)
a	Altura da parte comprimida
b_{ef}	Largura efetiva da mesa de concreto
b_f	Largura da mesa do perfil de aço
b	Largura unitária da laje
C_{cd}	Força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto
C_{ad}	Força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço
d	Altura total do perfil de aço
d_f	Distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma
d_3	Distância do centro geométrico da armadura longitudinal à LNP
d_4	Distância da força de tração
d_5	Distância da força de compressão
E	Módulo de elasticidade do aço
E_c	Módulo de elasticidade longitudinal do concreto
e	Distância do centro geométrico da área efetiva da fôrma à sua face inferior
e_p	Distância da linha neutra plástica da seção efetiva da fôrma

F_{hd}	Força de cisalhamento de cálculo entre os componente de aço e a laje, igual ao menor valor entre $A_a \cdot f_{yd}$ e $0,85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c$
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{cd}	Tensão de compressão de cálculo no concreto
f_{ucs}	Resistência à ruptura do aço do conector
f_y	Tensão de escoamento do aço
h	Altura da alma do perfil
h_t	Altura total da laje
h_p	Duas vezes a distância da linha neutra plástica da seção transversal à face interna da mesa comprimida
I_{ef}	Momento de inércia efetivo
I_a	Momento de inércia da seção do perfil de aço isolado
I_{tr}	Momento de inércia da seção mista homogeneizada
L_e	Comprimento do trecho de momento positivo (distância entre pontos de momento nulo, em metros, podendo ser tomado como igual a largura efetiva nas vigas contínuas e semicontínuas.
M_{Rd}	Momento fletor resistente de cálculo
M_{Sd}	Momento fletor máximo solicitante de cálculo
M_{pr}	Momento de plastificação da fôrma de aço, reduzido pela presença da força axial
M_{pa}	Momento de plastificação da fôrma de aço, considerando sua seção efetiva, dividido pelo coeficiente de ponderação da resistência γ_{al}
Q_1	Ação variável de base (ou principal)
Q_j	Ações variáveis que atuam simultaneamente a Q_1 e que têm efeito desfavorável

ΣQ_{Rd}	Somatório das forças resistentes de cálculo dos conectores de cisalhamento situados entre a seção de momento positivo máximo e a seção adjacente de momento nulo.
Q_{Rd}	Resistência do conector de cisalhamento
R_g	Coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;
R_p	Coeficiente para consideração da posição do conector;
T_{ad}	Força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço
T_{ds}	Força resistente de tração de cálculo nas barras da armadura longitudinal
t_w	Espessura da alma do perfil de aço
t_f	Espessura da mesa do perfil de aço
t_c	Altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço
η_i	Grau de interação da viga
y	Altura da linha neutra
γ_c	Coeficiente de ponderação da resistência do concreto
γ_s	Coeficiente de ponderação da resistência do aço
γ_{cs}	Coeficiente de ponderação da resistência do conector
γ_g	Coeficientes de segurança parciais aplicados às cargas;
γ_q	Coeficientes de segurança parciais aplicados às cargas;
ψ_0	Fator de combinação que reduz as ações variáveis para considerar a baixa probabilidade de ocorrência simultânea de ações de distintas naturezas com seus valores característicos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
3. JUSTIFICATIVA	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 Sistemas Estruturais	19
4.1.1 Sistemas Verticais (Sistemas Resistentes às Ações Horizontais)...	21
4.1.2 Sistemas Horizontais (Sistemas Resistentes às Ações Verticais) – Estruturas de piso	22
4.2 Estruturas de Concreto	22
4.3 Estruturas Metálicas	23
4.4 Estruturas Mistas Aço-Concreto	24
4.4.1 Vigas Mistas	24
4.4.1.1 Comportamento Estrutural	26
4.4.1.2 Conectores de cisalhamento	28
4.4.2 Lajes Mistas	32
4.4.3 Pilares Mistos	34
4.4.3.1 Comportamento estrutural	36
5. ESTUDO DO COMPORTAMENTO E DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS MISTOS	39
5.1 Vigas Mistas	39
5.1.1 Vigas mistas biapoiadas	39
5.1.2 Vigas mistas contínuas e semi-contínuas	41
5.1.3 Determinação dos deslocamentos	42
5.1.4 Verificação ao momento fletor	43
5.1.4.1 Largura Efetiva	43

5.1.4.2 Resistência quanto a momentos positivos	45
5.1.4.3 Resistência quanto a momentos negativos.....	47
5.1.5 Limitações para uso em lajes mistas.....	49
5.1.4 Conectores de Cisalhamento	50
5.2 Lajes Mistas	53
5.2.1 Estados limites últimos.....	53
5.2.1.1 Resistência ao momento fletor.....	54
5.2.2 Estado limite de serviço	56
5.2.2.1 Fissuração do concreto	56
5.2.2.2 Deslocamento vertical	57
5.2.3 Disposições construtivas	57
6. ESTUDO DE CASO.....	59
6.1 Pré-dimensionamento do pórtico principal de um edifício exemplo	59
6.2 Quantitativos.....	66
6.3 Levantamento de custos.....	68
7. ANÁLISE COMPARATIVA	72
7.2 Consumo de concreto.....	72
7.3 Consumo de aço – Barras e Perfis	73
7.3 Consumo total das estruturas.....	75
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
7.1 Sugestões para nova pesquisa	78
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
9 ANEXOS.....	82
9.1 Anexo A: Cálculos - Estrutura em concreto.....	82
9.2 Anexo B: Cálculos - Estrutura metálica.....	84

9.3 Anexo C: Cálculos - Estrutura mista aço-concreto86

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, apesar do predomínio de construções em concreto armado, este panorama está mudando devido a avanços tecnológicos e a busca por informações, o que têm proporcionado meios mais racionais de construção. Dentre os sistemas estruturais existentes estão os formados por elementos em aço, que apresentam como vantagem a total padronização dos elementos que o compõe, acelerando o processo construtivo e tornando esse sistema estrutural competitivo.

Com o crescimento da indústria siderúrgica no Brasil e a busca por novas formas arquitetônicas e estruturais, o emprego do aço vêm aumentando consideravelmente na construção civil. Os materiais aço e o concreto são a combinação mais frequente para compor essas estruturas, podendo ser usados separadamente na estrutura ou trabalhando em conjunto, formando elementos mistos.

Em relação aos principais materiais utilizados na construção civil, o concreto apresenta diversas vantagens como a alta resistência à compressão, elevada rigidez, proteção contra incêndio e corrosão, enquanto o aço oferece elevada resistência à tração, leveza e esbeltez dos elementos. Ambos os materiais atuam resistindo esforços solicitantes, mas a forma de sua utilização deve ser cuidadosamente analisada para que sejam viáveis construtiva e economicamente.

O sistema estrutural misto aço-concreto explora as melhores características de cada material, agrupando-as num só elemento. Esse tipo de método construtivo é objeto de estudo de pesquisadores há muitas décadas, deste modo representa um sistema já bastante difundido e utilizado na construção civil mundial. A partir do sistema construtivo misto pode-se obter soluções vantajosas para os principais elementos componentes de uma edificação, as lajes, vigas e pilares.

Atualmente, denomina-se sistema misto aço-concreto àquele no qual um perfil metálico trabalha em conjunto com o concreto (geralmente armado), formando um pilar misto, uma viga mista, uma laje mista ou uma ligação mista. A interação entre o concreto e o perfil de aço pode se dar por meios mecânicos (conectores, mossas, ressalto, etc), por atrito, ou, em alguns casos, por simples aderência e repartição de

cargas (como pilares mistos sujeitos apenas a força normal de compressão). Uma estrutura mista é formada por um conjunto de sistemas mistos, sendo esses normalmente empregados na construção de pontes e edificações.

Os primeiros elementos que utilizaram esse tipo de tecnologia foram as vigas mistas, datadas do fim do século XIX. Naquele tempo, o concreto era utilizado apenas para proteção dos elementos contra o fogo e a corrosão, a sua elevada resistência era desprezada nos cálculos.

Após a II Guerra Mundial, as vigas mistas passaram a ser amplamente utilizadas, pois com a carência de aço, os engenheiros europeus adicionaram como parte componente do vigamento a laje de concreto. Esse momento na história marca o princípio das pesquisas sobre o comportamento das vigas mistas aço-concreto para esforços estáticos e cíclicos.

Segundo Santos (2010), as primeiras construções mistas no Brasil se limitavam a alguns edifícios e pequenas pontes construídas entre os anos de 1950 e 1960. Em 1986, a NBR 8800 normatizou as estruturas mistas, entretanto apenas abordava os elementos mistos submetidos a flexão, as vigas mistas.

Cada material tem suas características que auxiliam na execução do projeto de acordo com suas prioridades. O sistema estrutural misto aço-concreto apresenta várias vantagens como será discorrido em breve, porém, antes de optar por um sistema específico, o engenheiro civil deve levar em consideração os seguintes critérios para a escolha do mais adequado:

- Utilização da edificação;
- Projeto Arquitetônico;
- Ações atuantes;
- Vãos a serem vencidos;
- Método construtivo;
- Mão de obra e tecnologia disponíveis;
- Prazo de execução da obra;
- Custo das fundações;
- Custo final da obra;
- Retorno do capital investido.

Embora muitas vezes a escolha do sistema estrutural de um edifício seja influenciada por imposições arquitetônicas, por rotinas construtivas ou ainda pela infra-estrutura da região, cabe ao engenheiro de estruturas buscar, dentro das condições impostas, a alternativa estrutural que garanta maior economia (ALBUQUERQUE, 1998).

Ao escolher o sistema misto em uma edificação, essa combinação de materiais deve ser estudada com atenção para conhecer o comportamento dessa estrutura no futuro. O comportamento misto e o dimensionamento deste sistema estrutural são determinados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 8800: “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”, atualizado em 2008.

Diante disso, neste trabalho pretende-se elaborar uma análise comparativa de quantitativos e custos de um estudo de casos de uma construção em sistema misto aço-concreto, metálica e em concreto, para servir de referência ao se fazer um anteprojeto. A revisão bibliográfica dará ênfase no método construtivo misto descrevendo suas características, vantagens e desvantagens.

2. OBJETIVOS

A pesquisa tem como finalidade apresentar os principais procedimentos de dimensionamento e desempenho dos elementos estruturais (vigas, lajes e pilares) constituintes de um sistema estrutural misto aço-concreto. A metodologia teórica teve como base as principais normas internacionais e a NBR 8800:2008, além das principais bibliografias e estudos relativos ao assunto.

Pretende-se abranger aspectos relativos ao projeto dos elementos mistos aço-concreto apresentando uma análise crítica com ênfase nos aspectos didáticos e normativos, além de um estudo de caso de uma edificação, comparando-se a solução de um pórtico composto de um sistema estrutural misto aço-concreto com os respectivos exemplares constituídos em concreto armado e outro em aço.

Ressalta-se que este trabalho também é oportuno em função de um levantamento de custos dos principais elementos estruturais, das três alternativas de sistemas estruturais do edifício-exemplo dado. Apresentando-se a composição

destes preços em forma de tabelas orçamentárias de cada método construtivo. Por fim, analisar e comparar os custos e consumo de materiais entre as soluções estruturais.

3. JUSTIFICATIVA

O sistema construtivo aço-concreto carece de estudos nacionais que avaliem de forma mais densa a relação custo-benefício. Apesar de ser um sistema consagrado em diversos países, as tecnologias utilizadas nesse padrão construtivo ainda não foram completamente disseminadas em âmbito local e continuam enfrentando barreiras no que diz respeito ao método construtivo e principalmente à mão de obra. Assim, torna-se necessário a realização de pesquisas que abordem esse assunto para que esse método apresente cada vez menos resistência quanto a solução construtiva para edifícios de múltiplos andares.

O estudo busca avaliar, de forma comparativa, por meio do pré-dimensionamento do pórtico principal de uma estrutura, as vantagens e limitações da adoção desse sistema no país. Além disso, o presente trabalho trás subsidio para comparação entre estruturas de concreto armado, metálicas e mistas aço-concreto através do levantamento quantitativo de materiais e custos, análise dimensional e das tensões atuantes. As comparações das tensões atuantes com as admissíveis verificam se os critérios de dimensionamento são atendidas na estrutura pelo método do estado limite último.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados aspectos gerais das estruturas de concreto, metálicas e mistas aço-concreto com ênfase no último sistema citado.

Como no estudo de caso será feita uma análise comparativa de custos de um edifício-exemplo construído nos três tipos de sistemas estruturais mais utilizados (concreto, aço e misto aço-concreto), serão abordados também, em síntese, alguns aspectos das estruturas de concreto e metálicas.

Os elementos mistos compõem um sistema estrutural e são constituídos basicamente por vigas, conectores, pilares e lajes. Para que um sistema estrutural aço-concreto seja considerado misto é necessário que estes elementos estruturais trabalhem como um só, isto é, quando dois materiais conectados de forma apropriada se deformam como um único elemento.

Serão abordados cada um destes elementos separadamente, evidenciando conceitos básicos para o dimensionamento adequado de uma estrutura mista. O leitor terá assim o conhecimento necessário para a escolha do sistema estrutural mais adequado para cada situação.

4.1 Sistemas Estruturais

Generalidades

O primeiro passo para um projeto bem sucedido é fazer um estudo meticoloso da arquitetura, instalações, métodos construtivos e condições locais e a partir disso seguir para os cálculos de dimensionamento da estrutura. A escolha do sistema estrutural para uma edificação envolve muitos fatores e por isso o engenheiro projetista deve analisar minuciosamente todos os detalhes envolvidos na construção para não ocorrer erros posteriores (FABRIZZI, 2007).

Qualquer tipo de construção deve obrigatoriamente atender ao estado limite de utilização e ao estado limite último para que seja considerada segura e adequada ao trânsito de pessoas ou qualquer outro tipo de uso/ocupação prevista.

Segundo Queiroz *et al* (2001), os estados limites de utilização estão relacionados com os critérios de serviço especificados e quando não são mais atendidos a estrutura começa a se modificar de diferentes formas, tais como:

- Dano ao concreto devido a compressão excessiva, que pode reduzir a durabilidade;
- Vibrações que causam desconforto, danos ao edifício ou ao seu conteúdo, ou limita sua eficiência funcional;
- Deformações ou deslocamentos que prejudicam a aparência ou o uso efetivo da estrutura ou causam danos a acabamentos e elementos não-estruturais.

O estado limite último diz respeito ao colapso parcial ou total da estrutura, que pode colocar em risco a segurança de pessoas. Em geral, os estados limites últimos incluem perda de equilíbrio da estrutura ou de parte dela, considerada como um corpo rígido. Além de deformações excessivas, rupturas, ou perda de estabilidade da estrutura ou de qualquer parte dela.

Segundo Bellei *et al* (2008), a escolha do sistema estrutural que vai dar sustentação ao edifício é de fundamental importância para o resultado final da obra, principalmente nos aspectos que se referem ao peso da estrutura, facilidade de fabricação, da rapidez de montagem e conseqüentemente do custo final da obra. A estabilidade quanto às cargas verticais, como a pressão do vento, pode ser dada a partir de contraventamentos verticais, os quais permitem que a estrutura trabalhe de forma mais simples com maior número de ligações flexíveis e tirando o máximo de proveito das vigas mistas, o que torna a estrutura mais leve e fácil de montar. Já quando não é possível a utilização dos contraventamentos, a estrutura demanda que suas ligações sejam rígidas, fazendo com que a montagem da estrutura fique mais lenta e menos econômica.

Todos os edifícios recebem ações verticais e horizontais, de maior parte pelo peso próprio, cargas permanentes e os ventos, respectivamente, os quais são transferidos para a fundação dessas estruturas. Os esforços exercidos pelas cargas aplicadas à estrutura e as ações da natureza podem ser calculados premeditadamente, com o objetivo de oferecer suporte as solicitações verticais que serão exercidas na edificação.

Para o melhor entendimento do comportamento de um sistema estrutural, os edifícios de múltiplos andares podem ser divididos em sistemas resistentes às ações horizontais e os resistentes às ações verticais.

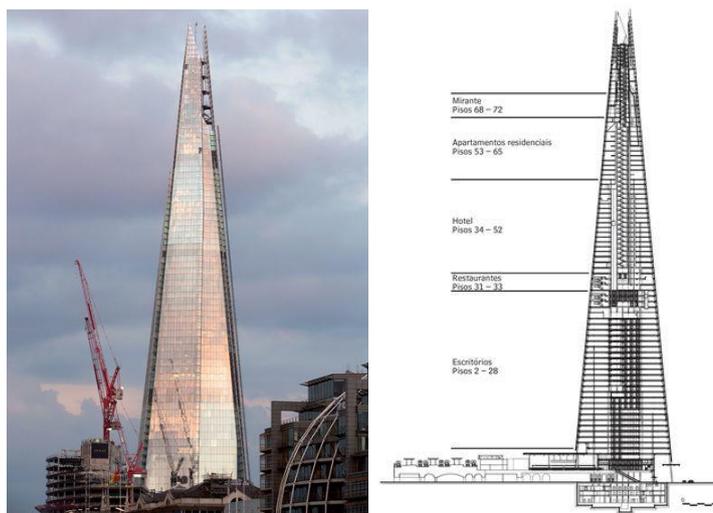
4.1.1 Sistemas Verticais (Sistemas Resistentes às Ações Horizontais)

Esse subsistema pode ser formado por pilares, pórticos, paredes, núcleos resistentes, contraventamentos, treliças entre outros. A função básica desses elementos é a transmissão das forças horizontais e gravitacionais para a fundação, garantia da estabilidade global do edifício e resistência às ações dos ventos.

Segundo Alva (2000), não há uma unanimidade entre autores sobre a denominação desses sistemas verticais. Assim, pode-se fazer uma subdivisão em relação as suas características estruturais mais importantes:

- Sistemas aporticados;
- Sistemas com núcleo resistente;
- Sistemas treliçados;
- Sistemas tubulares.

Figura 1 - The Shard (2012), Londres



Fonte: <http://www.revistatechne.com.br/engenhariacivil/185/piramide-londrina-edificio-mais-alto-da-europa-emprega-estrutura-265256-1.asp>

No exemplo da Figura 1, o edifício é composto por um núcleo rígido de concreto, o que garante a segurança relacionada as ações horizontais provocada pelos ventos e a estabilidade em caso de sismos. A partir do núcleo, a estrutura reticulada é formada por vigas mistas, pilares mistos e laje mista "*steel deck*", que viabilizaram vãos de até 15 metros entre a fachada e o núcleo de concreto.

4.1.2 Sistemas Horizontais (Sistemas Resistentes às Ações Verticais) – Estruturas de piso

Os sistemas horizontais são constituídos pelas lajes, vigas e possíveis contraventamentos onde o comportamento predominante é a flexão. Como esses elementos tem a função de transferir e distribuir as forças horizontais para os sistemas verticais principais (pilares e paredes estruturais) pode-se dizer que as lajes e vigas atuam como diafragmas na estrutura (ALVA, 2000).

4.2 Estruturas de Concreto

Um material de construção com finalidade estrutural deve apresentar como qualidades essenciais, resistência, durabilidade e disponibilidade, e o concreto atende bem todas essas demandas.

Desde a sua criação, o concreto é amplamente utilizado na construção civil, porém, com o advento de outros materiais que trabalhando em conjunto, foi possível superar a deficiência do concreto quanto a resistência à tração. Com isso, surgiu o concreto armado, cuja armadura é usualmente constituída por barras de aço de seção circular ou outros materiais resistentes à tração como o sisal e o bambu.

Segundo Clímaco (2008), a utilização do concreto armado na construção civil não é tão antiga quanto muitos pensam, as primeiras edificações com embasamento técnico e modelos de cálculos racionais datam de menos de cem anos. Mas desde então, tem sido empregada em larga escala na indústria da construção. O concreto é definitivamente o material estrutural mais utilizado pela humanidade, segundo pesquisas, o único material consumido em maior quantidade seria a água.

4.3 Estruturas Metálicas

Aparentemente, o aço é uma descoberta feita nos últimos séculos, porém existem evidências que esse material já era utilizado aproximadamente 6 mil anos a.C., no Egito, Babilônia e Índia. Entretanto, sua utilização em escala industrial iniciou-se apenas com a revolução industrial em meados do século XIX, na Inglaterra, França e Alemanha.

A produção de aço no Brasil só teve início na década de 20, com a criação da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira e em 1940 foi fundada a Companhia Siderúrgica Nacional. Desde então, o mercado de aço no Brasil cresceu abundantemente, deixando assim de importar o material e agora o exportando (BELLEI *et al*, 2008).

O aço compõe edificações que são consideradas como verdadeiros marcos do ponto de vista arquitetônico, como o Edifício da Casa do Comércio da Bahia em Salvador, na Figura 2.

Figura 2- Edifício Casa do Comércio da Bahia – Salvador



Fonte: Acervo pessoal

As estruturas metálicas podem ser usadas em quase todos os tipos de construções civis, indústrias e viárias. Por terem seus elementos estruturais produzidos em fábricas por processos industrializados seriados, apresentam

menores custos e maior controle quanto a qualidade das peças. Com isso, o prazo de execução de uma obra com esse sistema construtivo é reduzido se comparado com outros tipos, sendo muitas vezes o método mais economicamente viável para certos tipos de construção.

4.4 Estruturas Mistas Aço-Concreto

Em um sistema misto, as características do aço e do concreto se complementam no que se refere ao desempenho estrutural, com o concreto reunindo resistência à compressão, elevada rigidez e proteção contra incêndio e corrosão, enquanto que o aço apresenta elevada resistência à tração, leveza e esbeltez dos elementos. Ao empregar esses dois materiais trabalhando juntos, como elementos mistos, temos como vantagens:

- Flexibilidade construtiva e arquitetônica;
- Possibilidade de dispensa de fôrmas e escoramentos;
- Redução do peso próprio e do volume da estrutura, propiciando fundações mais econômicas;
- Boa aderência entre os materiais, o que colabora para sua interação;
- Proteção ao fogo e corrosão;
- Possibilidade de vencer médios e grandes vãos;
- Coeficientes de dilatação térmicos próximo, não ocasionando deformações térmicas diferenciais significativas.

Comparando com estruturas em concreto armado, o sistema misto aço-concreto tem como uma de suas principais vantagens a capacidade de vencer médios e grandes vãos, abrindo uma ampla possibilidade para projetos de edificações que necessitam de distâncias consideráveis entre pilares.

4.4.1 Vigas Mistas

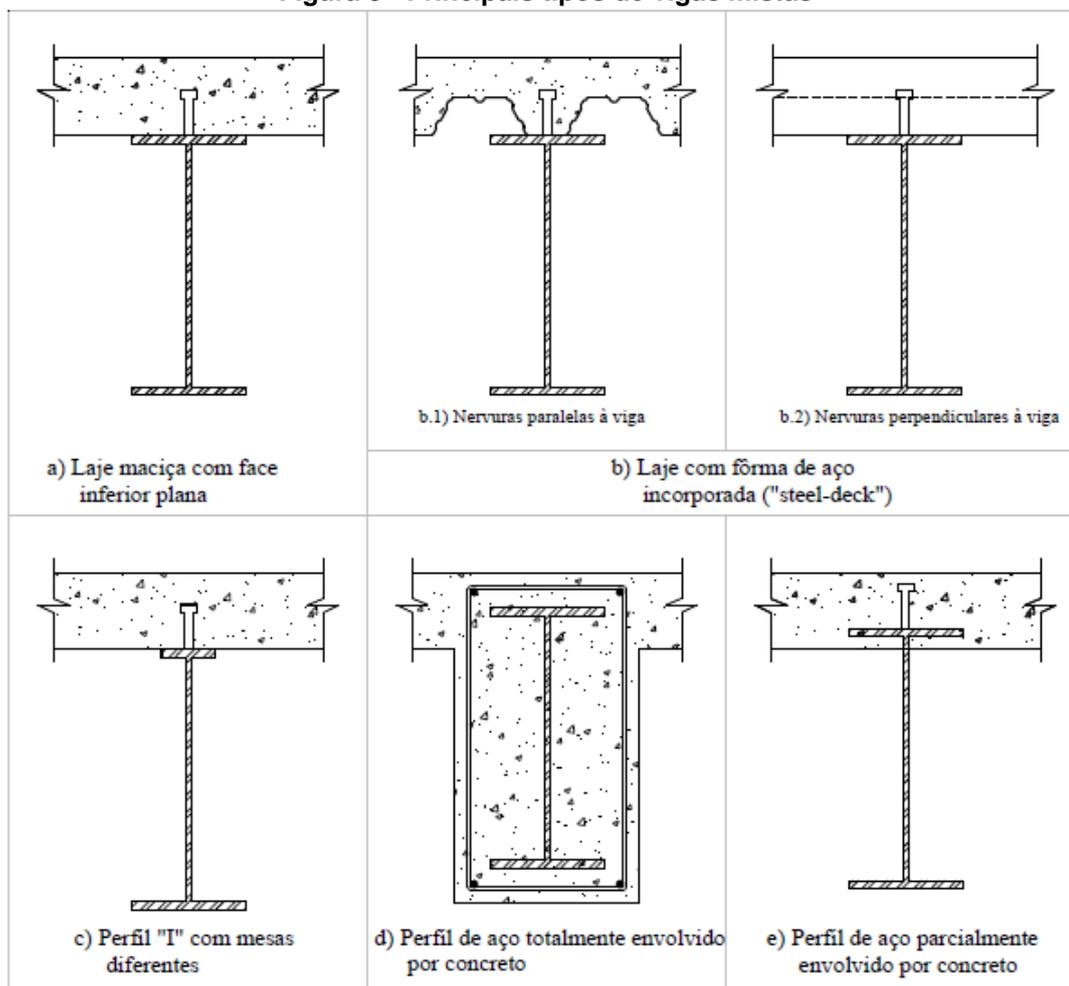
Inicialmente é preciso definir o que é uma viga, um conceito básico para começar um estudo mais aprofundado sobre este tipo de elemento. Basicamente, vigas são os elementos estruturais das edificações que recebem as cargas transmitidas pelas lajes e se apoiam nos pilares.

Segundo Fabrizzi (2007), a viga mista é um elemento composto por um perfil de aço, geralmente tipo “I” classificado como de alma cheia, que é vinculado através de conectores a uma laje de concreto maciça ou tipo “*steel deck*” (laje mista aço-concreto com fôrma incorporada). A viga mista suporta a laje que é apoiada a mesa superior do perfil, a conexão entre elas deve ser feita de forma adequada para que os elementos trabalhem em conjunto para resistir aos esforços de flexão.

Devido a sua leveza em relação a outros tipos de vigas e a sua facilidade de construção, este é considerado o sistema de pisos mais eficiente, podendo ser empregado em edifícios de múltiplos andares (residencial e comercial e tabuleiros de pontes). Em comparação com as vigas de aço isoladas, nas mistas aço-concreto a flambagem local da mesa (FLM), da alma (FLA) e a flambagem lateral com torção são impedidas ou amenizadas. A rigidez e a resistência obtida pela combinação do aço e do concreto propicia a redução de altura dos elementos estruturais, assim economizando em material. (ALVA & MALITE, 2005).

A combinação dos dois materiais básicos podem formar vários tipos de vigas mistas. Os principais tipos são apresentados na Figura 3 a seguir:

Figura 3 - Principais tipos de vigas mistas



Fonte: (FABRIZZI, 2007)

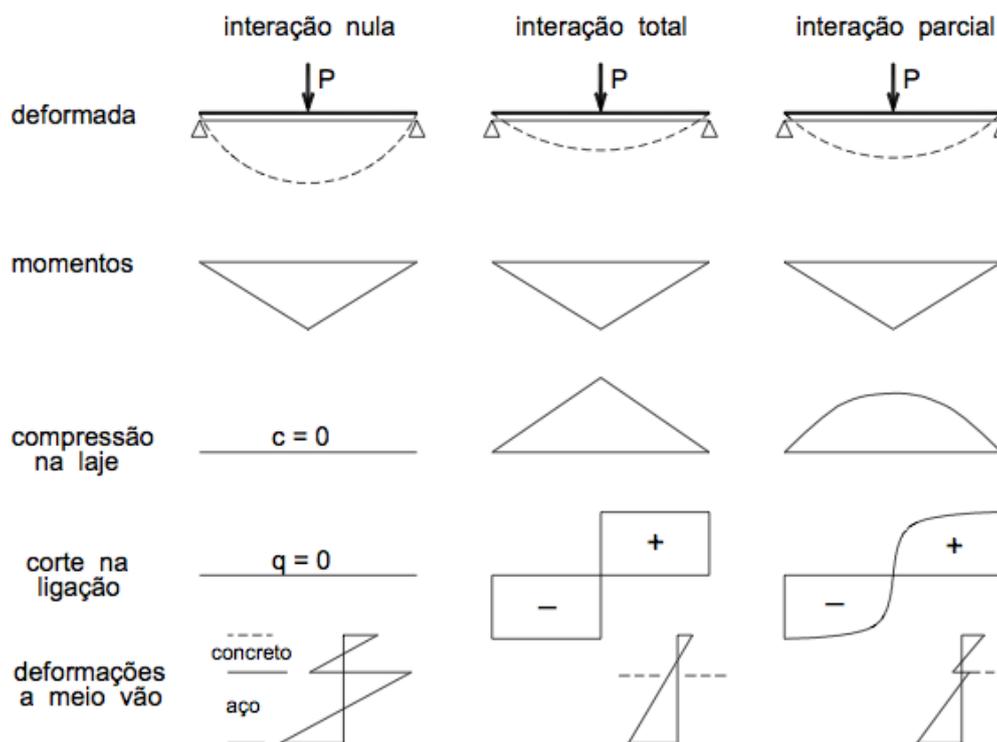
As vigas mistas podem ser simplesmente apoiadas ou contínuas. Nas simplesmente apoiadas a mesa inferior do perfil de aço absorve predominantemente a tração enquanto o concreto da laje atua na compressão. As vigas contínuas atuam de forma diferente, pois apresentam momentos fletores negativos em sua composição, entretanto propiciam maior estabilidade global à estrutura.

4.4.1.1 Comportamento Estrutural

Como dito anteriormente, a interação aço-concreto é o que define se o elemento será misto ou não. Esse grau de conexão pode ser analisado a partir da Figura 4 e o dimensionamento da viga deve ser feito com a avaliação de acordo com o comportamento desta ligação. Na interação nula há o escorregamento na interface

aço-concreto formando duas linhas neutras quando a peça é solicitada. Na interação parcial há um escorregamento relativo menor em relação ao perfil isolado, porém é constatada ainda a presença de duas linhas neutras. Já na interação total podemos dizer que o aço e o concreto trabalham numa ligação sem qualquer tipo de deslocamento horizontal, obtendo-se assim uma única linha neutra (FABRIZZI, 2007).

Figura 4 - Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas



Fonte: (ALVA, 2000)

O comportamento estrutural de uma viga mista depende também da existência ou não de momentos fletores negativos decorrentes das condições de vinculação dessa viga.

O processo construtivo também influencia no dimensionamento da viga mista. A edificação da viga pode ser feita por um sistema escorado ou não escorado. No sistema escorado, todos os esforços serão resistidos pela seção mista e o escoramento poderá ser retirado após a obtenção da resistência suficiente do concreto na laje. Já no sistema não-escorado a viga de aço é projetada para suportar o peso próprio do concreto e das solicitações decorrentes da construção,

uma vez que o concreto não apresenta a resistência necessária antes da cura. Para que o concreto atinja a resistência de projeto são necessários normalmente 28 dias e a escolha pelo tipo de sistema depende das exigências de cada projeto. (CATAI, 2005).

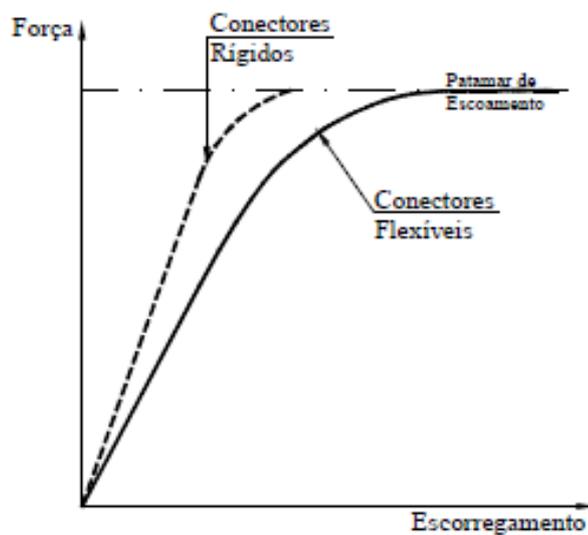
A viga não-escorada evita custos do escoramento e restrições de espaço disponível na obra, por outro lado pode apresentar problemas de deslocamentos excessivos durante a construção e em serviço.

4.4.1.2 Conectores de cisalhamento

A interação entre os elementos mistos aço-concreto é fundamental para que haja um comportamento estrutural adequado neste tipo de sistema. Nas vigas mistas, essa interação é feita através de conectores de cisalhamento, peças soldadas à mesa superior do perfil que fazem a união da viga de aço com a laje de concreto. As lajes em que esses conectores serão vinculados podem ser maciças ou *steel deck* (com forma de aço integrada). Essas peças apresentam como funções principais, a transferência dos esforços cisalhantes longitudinais entre os dois elementos estruturais, viga e laje, desempenham papel também quanto ao bloqueio do deslocamento vertical na interface dos dois materiais. Apesar de constituírem parte indispensável do sistema laje-viga, os conectores não apresentam custo elevado no contexto geral da edificação.

Os conectores de cisalhamento são classificados em flexíveis e rígidos, essa determinação é definida pela restrição quanto ao deslocamento relativo aço-concreto, conferida a ligação laje/viga mista. Em outras palavras, a dificuldade que essa ligação terá para sofrer qualquer tipo de escorregamento na interface aço-concreto.

Nos tipos rígidos, a ruptura se dá de maneira frágil, isto é, não apresenta patamar de escoamento. Já nos conectores flexíveis, existe este patamar e, por consequência, proporciona uma ruptura dúctil (Figura 5).

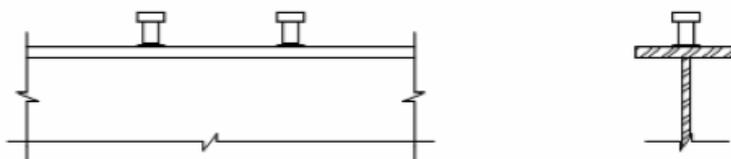
Figura 5 – Comportamento de conectores rígidos e flexíveis

Fonte: (FABRIZZI, 2007)

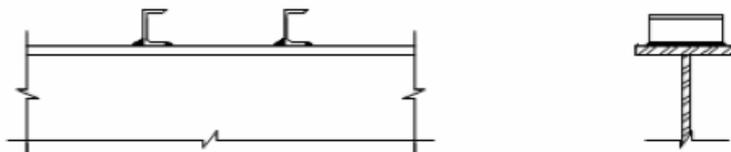
Os principais conectores empregados em edifícios e pontes no mundo e previstos na NBR 8800:2008 são os tipos pino com cabeça (*stud bolt*) e os perfis U laminados ambos do tipo flexíveis. São apresentados na Figura 6 os tipos mais usuais de conectores sendo (a, b e c) com comportamento flexível e (d, e) rígido.

Figura 6 – Tipos usuais de conectores de cisalhamento

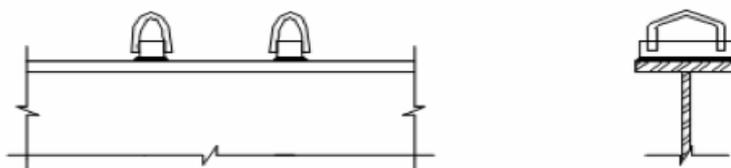
a) Pino com cabeça (STUD)



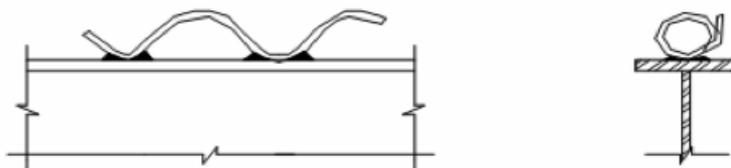
b) Perfil "U"



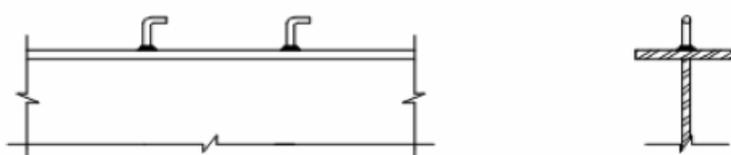
c) Barra com alça



d) Espiral



e) Pino com gancho



Fonte: (MALITE,1990)

Na prática, o tipo pino com cabeça, Figura 7, é o mais utilizado por apresentar um processo automático de soldagem (“*stud welding*”) utilizando uma “pistola” de solda e tornando muito mais ágil e fácil o emprego desse tipo de conector. Entretanto, podem ser criados novos tipos, contanto que sua resistência e seu comportamento sejam comprovados (MALITE, 1990).

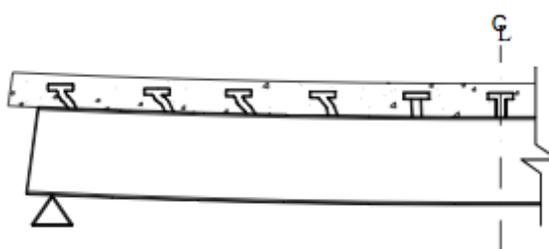
Figura 7 – Conector de cisalhamento tipo pino com cabeça (stud bolt)



Fonte: http://portuguese.stud-welding-machine.com/china-gbt_m25_250_inner_threaded_stud_welding_accessories_shear_connectors_for_arc_stud_gun-329198.html (acesso 06/05/14 às 19:09)

Nos conectores flexíveis tem-se uma capacidade de deformação antes da ruptura e com isso é possível fazer uma redistribuição das tensões do conector mais solicitado (próximo ao apoio) ao menos solicitado (meio do vão), como ilustrado na Figura 8 abaixo.

Figura 8 – Comportamento dos conectores ao longo da viga mista



Fonte: (FABRIZZI, 2007)

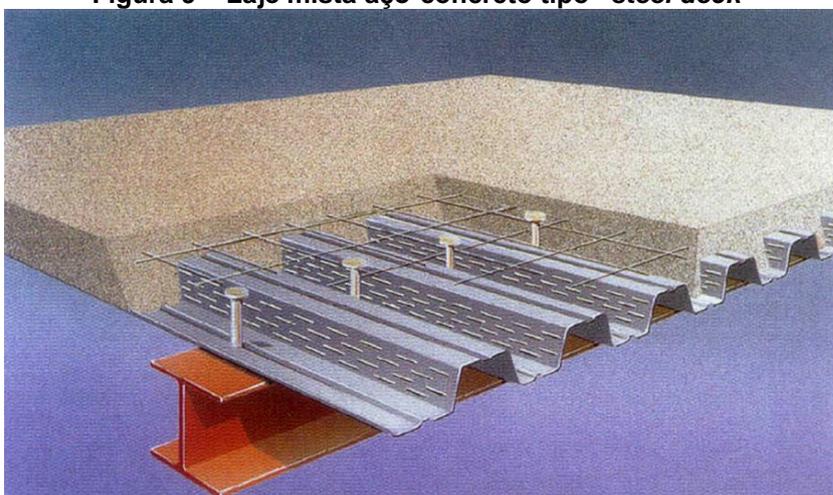
Segundo Fabrizzi (2007), no caso desses conectores dúcteis (capazes de redistribuir as tensões), quando a resistência máxima é atingida ocorre a deformação e a transferência do esforço para o conector vizinho e assim sucessivamente, assumindo-se uma plastificação total dos conectores. Portanto, no

dimensionamento destes conectores é possível projetá-los com espaçamento constante ao longo de todo o vão.

4.4.2 Lajes Mistas

O sistema de lajes mistas consiste na utilização de uma fôrma de aço nervurada (com mossas na superfície que garantem a aderência) que é incorporada pelo sistema misto e exerce as funções de armadura positiva e a de fôrma propriamente dita antes da cura do concreto (Figura 9).

Figura 9 – Laje mista aço-concreto tipo “*steel deck*”

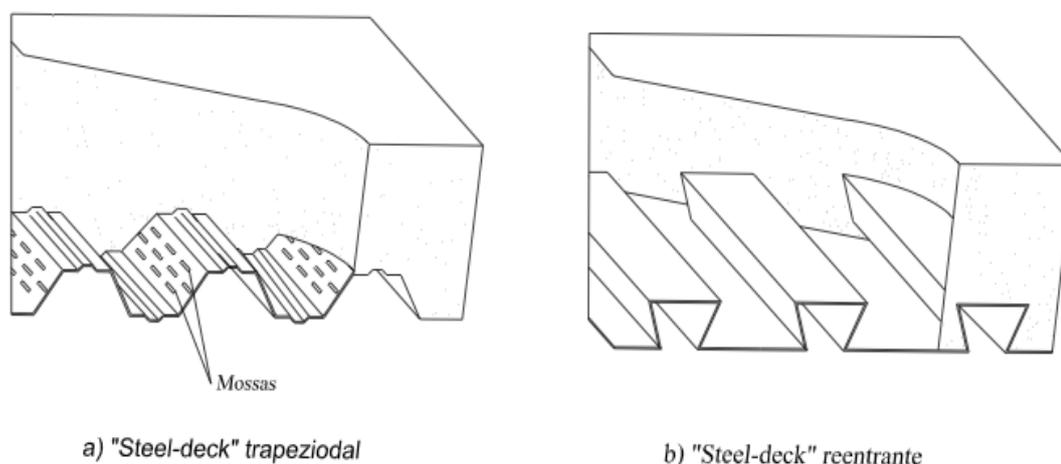


Fonte: Catálogo CODEME

O sistema de laje mista *steel deck* (fôrma de aço aliada a uma camada de concreto moldado “*in loco*”) é muito conhecido e largamente utilizado na Europa, Estados Unidos e Japão, destacando-se na construção de shopping centers, hotéis, hospitais, edifícios residenciais e comerciais e garagens. No Brasil, esse método vem ganhando espaço crescente com a inserção de novas tecnologias nas construções.

A fôrma de aço deve ser capaz de transmitir o cisalhamento longitudinal na interface entre o aço e o concreto. A aderência natural entre o aço e o concreto não é o bastante para que esse elemento apresente comportamento misto, portanto há a necessidade de uma ligação mecânica por meio de mossas nas fôrmas trapezoidais ou através do atrito nas fôrmas com reentrâncias (Figura 10).

Figura 10 - Principais tipos de lajes mistas



Fonte: (FABRIZZI, 2007)

Segundo Silva e Pannoni (2010), as principais vantagens e desvantagens do uso da fôrma de aço incorporada são:

VANTAGENS

- Economia de concreto devido às reentrâncias da fôrma;
- Limpeza da obra;
- Utilização da fôrma como plataforma de trabalho e proteção aos operários que trabalham nos andares inferiores;
- Eliminação de escoramento, se os vãos entre as vigas-suporte da fôrma forem de até 3m;
- Facilidade de passagem de dutos e de fixação de forros;
- Eliminação da desfôrma;
- Redução de desperdício de material;
- Facilidade de instalação e maior rapidez construtiva;
- Estrutura mais leve, propiciando uma economia no custo da fundação;

DESVANTAGENS

- Necessidade do uso de forro falso para esconder a fôrma por razões estéticas;

- Maior quantidade de vigas secundárias para suportar a fôrma caso se opte por não usar escoramento;
- Pode ser necessária uma armadura inferior para resistir ao esforços em caso de incêndio, dependendo das exigências de resistência ao fogo.

Portanto, é necessário um estudo econômico para verificar a viabilidade do seu uso, pois nem sempre esse método construtivo será o mais indicado.

Para o cálculo de lajes mistas, deve-se fazer a análise do sistema tanto na fase de construção, levando em conta o peso do concreto fresco e também a sobrecarga de construção, quanto na fase final ou mista, após a resistência do concreto ter atingido $0,75f_{ck}$, quando então diversos estados limites devem ser verificados, com ênfase no cisalhamento longitudinal. No dimensionamento, deve-se considerar também a vida útil da estrutura como laje mista analisando os estados limites de utilização e o os estados limites últimos.

De acordo com Queiroz *et al* (2001), a fôrma de aço, por razões de ordem econômica, tem espessura comercial entre 0,75 e 1,20 mm para evitar corrosão a chapa é galvanizada.

4.4.3 Pilares Mistos

São denominados pilares os elementos estruturais sujeitos a compressão pura ou a ação conjunta da compressão e flexão. Um pilar misto pode ser definido quando um perfil é total ou parcialmente revestido ou para um tubo de aço (circular ou retangular) preenchido por concreto, resultando no trabalho conjunto dos materiais sem escorregamento relativo significativo na superfície de contato (NÓBREGA, 2003).

Nesse tipo de pilar é possível a adição de chapas metálicas ao redor do pilar de concreto ou o acréscimo de armaduras e a utilização de fôrmas em elementos compostos por perfil metálico, incidindo desta forma, em um aumento da resistência e da rigidez.

O crescente número de pesquisas relacionadas a pilares mistos nas últimas duas décadas, devido as suas vantagens, promoveu o desenvolvimento de novos

métodos de dimensionamento e, conseqüentemente, um aumento na utilização desse tipo solução estrutural.

Os pilares mistos podem ser considerados interessantes tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Entre suas vantagens pode-se citar:

- Redução das dimensões dos elementos estruturais;
- Menor mão-de-obra
- Maior área livre por pavimento;
- Melhor comportamento quando submetido a ações cíclicas;
- Capacidade resistente imediata a partir do momento de montagem diferentemente da estrutura apenas de concreto.

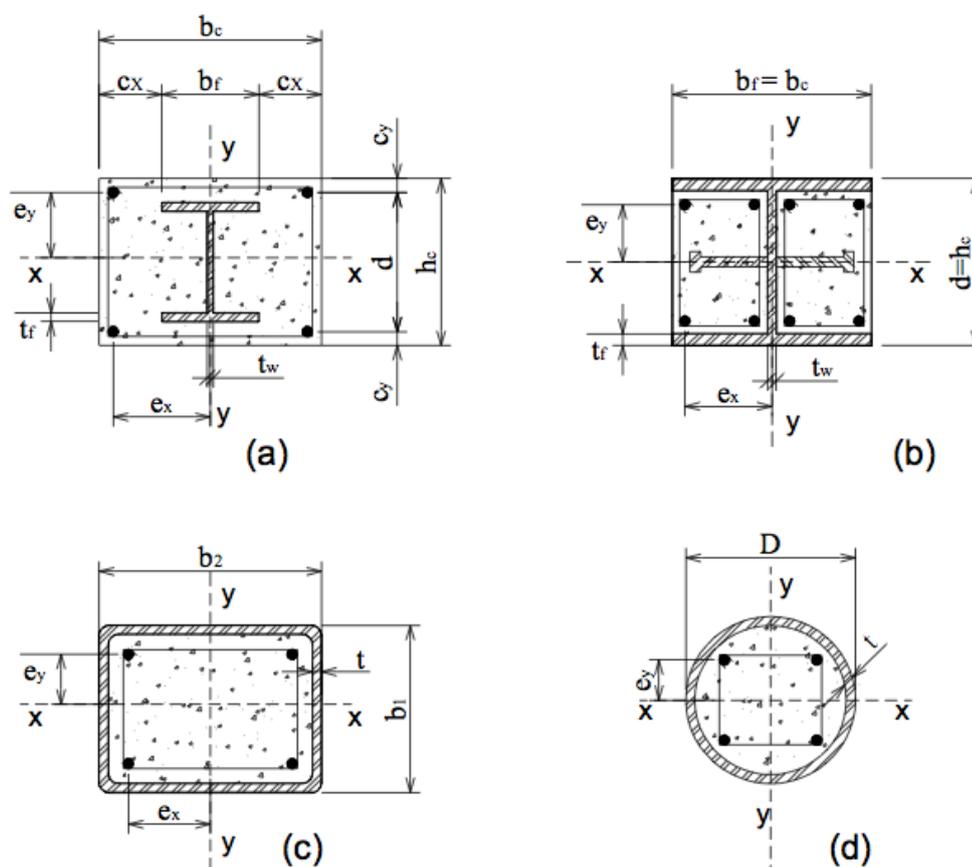
Tipos de pilares mistos

Neste tópico serão analisados os tipos de pilares mistos mais comuns: perfil I de aço totalmente envolvido por concreto (Figura 11 - a); perfil I de aço parcialmente envolvido por concreto (Figura 11 - b); Tubo de aço (com seção retangular ou circular) preenchido por concreto (Figura 11 - c e d). Segundo Queiroz *et al* (2001), a seção do pilar misto deve ser duplamente simétrica e constante ao longo do comprimento do pilar.

Os pilares mistos com seção transversal totalmente revestida por concreto, laminados ou soldados, propiciam maior proteção contra a ação do fogo, corrosão e impactos, maior resistência a compressão, redução dos efeitos da flambagem local e podem ser laminados ou soldados. A principal desvantagem é a necessidade de utilização de fôrmas para a concretagem, tornando sua execução mais trabalhosa, quando comparada ao pilar misto preenchido.

Já pilares mistos preenchidos tem como principal benefício a dispensa de fôrmas e armaduras e um aumento considerável na resistência ao incêndio do perfil tubular. Nesse tipo de elemento é possível ainda considerar o efeito de confinamento do concreto.

Figura 11 – Tipos de pilares mistos



Fonte: (ALVA, 2000)

4.4.3.1 Comportamento estrutural

Diversos parâmetros interferem na resistência e no comportamento dos pilares mistos, tais como aderência, resistência do concreto, limite de escoamento do aço, efeito de confinamento do concreto, retração do concreto, esbeltez, efeito de fluência e retração, entre outros. Entretanto, alguns destes influenciam mais e outros menos na resistência final do pilar misto.

Efeito De Confinamento Do Concreto

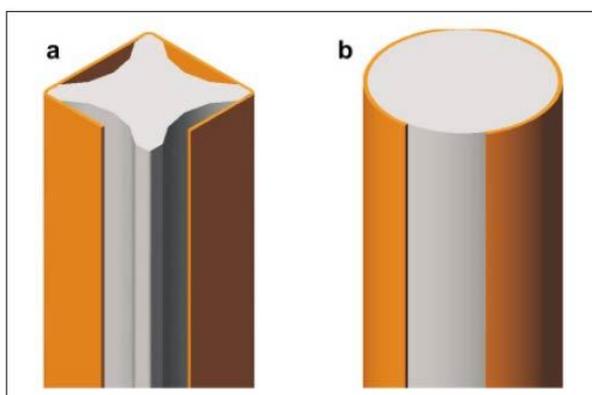
As normas brasileiras consideram o efeito de confinamento apenas em pilares mistos de seção circular por este ser consideravelmente maior que outros tipos de seções. Este efeito ainda é pouco estudado devido principalmente à dificuldade de

realização de ensaios sobre a magnitude em diferentes seções transversais e a sua ocorrência.

Segundo Alva (2000), o efeito acontece quando se atinge certo nível no carregamento do pilar, onde a expansão lateral do concreto é maior que a do perfil de aço, criando pressões radiais na interface aço-concreto, assim, pode-se dizer que o concreto é submetido a um estado triaxial de tensões (Figura 12). Essas pressões radiais e a força normal de compressão atuante desenvolvida provocam uma diminuição da resistência do perfil de aço, pois o submete a uma tração tangencial.

A resistência à compressão do concreto aumenta quando comparado ao não confinado, isto faz com que se tenha um ganho na capacidade do pilar. Estes benefícios do confinamento do concreto são maiores em pilares curtos e nos que possuem menores excentricidades em relação a força normal que em pilares esbeltos.

Figura 12 – Comportamento estrutural dos pilares preenchidos por concreto



Fonte: Autora

Efeito de Retração e Fluência

Após a obtenção do comportamento misto no pilar, o concreto sofrerá, ao longo do tempo, efeitos como o de retração e fluência. Estes efeitos causam deformações adicionais ao concreto que serão aos poucos transferidas para o perfil de aço.

A retração em pilares mistos é menor que comparado a pilares de concreto armado, pois no caso de perfis tubulares há a proteção do perfil de aço contra as

ações externas do meio. Embora seja menor em elementos mistos, esse fenômeno causa deformações e distribuição de tensões ainda significativas.

No caso do efeito de fluência, este fenômeno ocorre quando são aplicados carregamentos constantes de longa duração, podendo chegar a três vezes o valor da deformação elástica instantânea. O acréscimo de deformações ocasionado pelo efeito independe do acréscimo do carregamento.

Aderência Entre o Aço e o Concreto

Para que ocorra um comportamento misto nos elementos deve-se existir aderência entre os materiais aço e concreto. Esta conexão entre os materiais pode ser gerada apenas por atrito e adesão, mas caso estes fatores não sejam suficientes para uma interação completa entre os materiais, são utilizados conectores de cisalhamento. Esta conexão mecânica garantirá que exista a transferência completa dos esforços para a interface dos materiais.

Os pilares mistos são elementos essencialmente comprimidos e, por isso, são normalmente considerados com interação completa. Por conseguinte, as normas consideram como hipótese básica para o cálculo destes pilares a relação absoluta entre os materiais, desde que as tensões cisalhantes longitudinais não ultrapassem valores estabelecidos pela norma. Para que se mantenha esta condição, não deve haver deslizamento relativo excessivo entre os dois materiais (NARDIN, 1999).

5. ESTUDO DO COMPORTAMENTO E DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS MISTOS

5.1 Vigas Mistas

A NBR 8800:2008 aborda no Anexo O como deve ser feito o dimensionamento de vigas mistas aço-concreto que consistem em um componente de aço simétrico em relação ao plano de flexão, que normalmente é um perfil I ou uma treliça, com uma laje de concreto acima de sua face superior. O dimensionamento de vigas mistas depende, além das dimensões dos elementos, do tipo de interação que a viga terá com a laje, seja completa ou parcial. (ALVA & MALITE, 2005)

Para que a viga tenha um comportamento misto, essa deve ser propriamente vinculada às peças, denominadas conectores de cisalhamento, que desenvolvem forças longitudinais na interface aço-concreto de maneira que a viga mista resista à flexão como dimensionado.

Segundo Fabrizzi (2007), a utilização de vigas mistas biapoiadas ou contínuas irá depender da geometria do edifício, método de execução, sistema estrutural adotado, disponibilidade de materiais e serviços. Essas apresentam um comportamento estrutural diferente para cada tipo, podendo ser listados algumas características a seguir.

5.1.1 Vigas mistas biapoiadas

As vigas mistas biapoiadas são aquelas em que as ligações nos apoios podem ser consideradas como rótulas e, nesse tipo de viga, os materiais aço e concreto são solicitados de forma mais adequada, ou seja, as fibras superiores (concreto) sofrem compressão e as fibras inferiores (aço) tração (NBR 8800:2008). Portanto, esse tipo de viga mista é submetida apenas a momentos fletores positivos, sendo seu dimensionamento mais simples que as submetidas a momentos negativos (contínuas e semi-contínuas).

Esse elemento misto é comumente dimensionado como sendo simplesmente apoiado devido as suas ligações serem, na maioria das vezes, feitas com cantoneiras de alma ou chapa simples que, por sua vez, possui pouca resistência à flexão.

Segundo Johnson (1994), as vigas mistas biapoiadas apresentam as seguintes vantagens em relação as vigas mistas contínuas e, por isso, empregadas mais frequentemente:

- Uma pequena parcela da alma de aço apresenta compressão e a mesa superior do perfil é travada pela laje, logo a resistência da viga não é limitada pela flambagem do perfil de aço;
- A alma é sujeita a estados de tensões menores, o que permite a elaboração de furos para passagem de dutos;
- Momentos fletores e forças de cisalhamento são estaticamente determinadas, e não são influenciadas por deformações, fissurações ou retração do concreto;
- Não há interação entre o comportamento de vãos adjacentes;
- Momentos fletores nos pilares são menores;
- O concreto no topo da laje não é tensionado, exceto sobre os suportes;
- A análise estrutural é mais simples e o dimensionamento é rápido.

A NBR 8800:2008 determina que vigas mistas aço-concreto de alma cheia biapoiadas devem ter a seguinte relação, pois não é recomendado o dimensionamento dessas com sessões esbeltas:

$$h/t_w \leq 5,7\sqrt{E/f_y} \quad (1)$$

Onde:

h e t_w - Altura e a espessura da alma do perfil, respectivamente.

E - Módulo de Elasticidade

f_y - Resistência ao escoamento do aço

Quando,

Tabela 1 - Classificações de vigas mistas de alma cheia biapoiadas

$h/t_w \leq 3,76 \sqrt{E/f_y}$	<p>São vigas compactadas e podem ser dimensionadas usando as propriedades plásticas da seção mista.</p>
$h/t_w > 3,76 \sqrt{E/f_y}$	<p>As vigas devem ser dimensionadas usando as propriedades elásticas da seção mista.</p>

Geralmente as vigas mistas biapoiadas possuem a mesa superior refreada pela laje de concreto, assim não ocorre flambagem lateral com torção (FLT) nem flambagem local da mesa (FLM). Segundo Alva & Malite (2005), em geral, a flambagem local da alma (FLA) não é determinada em vigas de edifícios, onde a relação h/t_w é relativamente pequena.

5.1.2 Vigas mistas contínuas e semi-contínuas

Neste caso, a mesa de concreto da laje será tracionada e o perfil de aço da viga comprimido, sendo considerado na resistência apenas a armadura devidamente ancorada e a resistência do concreto da laje desprezado. Já o perfil de aço comprimido sofrerá os efeitos da instabilidade.

Segundo Johnson (1994), as vantagens de vigas contínuas ou semi-contínuas em relação às biapoiadas, para uma dada laje dimensionada com carga por unidade de comprimento da viga, são:

- Para dados limites de flecha, poderá ser feita maiores relações vãos por altura da viga;
- Para os mesmos carregamentos e distância entre apoios, os momentos fletores positivos serão menores.
- A fissuração da superfície superior da laje nas regiões próxima dos pilares internos pode ser controlada fazendo o uso de acabamentos frágeis;
- A estrutura é menos suscetível a vibrações causadas por trânsito de pessoas;

A principal desvantagem seria a complexidade do sistema, ações praticadas em uma laje causam reações em lajes adjacentes e na resistência a rigidez e flexão da viga ao longo do seu comprimento. Além disso, a laje de concreto sofrerá fissuras, que é influenciada pelo método construtivo, efeitos de temperatura e retração, podendo até apresentar um estado limite de utilização.

Nas regiões de momento positivo o dimensionamento das vigas contínuas ou semi-contínuas é idêntico ao de vigas simplesmente apoiadas. Já em regiões de momento negativo, o sistema misto acaba perdendo eficiência pois reduz a resistência à flexão provocada pela fissuração do concreto tracionado. Pode-se então acarretar instabilidade antes de chegar a resistência última da viga mista. Essa instabilidade pode ser dada por flambagem local da mesa (FLM), alma (FLA) e flambagem lateral com torção (FLT) (HIGAKI, 2009).

Segundo a NBR 8800:2008, as vigas mistas aço-concreto de alma cheia contínuas e semicontínuas devem possuir ligação mista. Caso $h_p/t_w \leq 3,76\sqrt{E/f_y}$ e $b_f/t_f \leq 0,38\sqrt{E/f_y}$ então as vigas serão compactas e os esforços internos podem ser determinados por análise rígido-plástica.

Onde:

h_p - Duas vezes a distância da linha neutra plástica da seção transversal à face interna da mesa comprimida.

t_f - Espessura da mesa

5.1.3 Determinação dos deslocamentos

As propriedades geométricas de uma seção em aço e outra em concreto são de fácil determinação por serem consideradas como isotrópicas e homogêneas, porém para seções mistas não é possível analisá-las sendo equivalentes a essas isoladas (SANTOS, 2010). De acordo com a NBR 8800:2008, as propriedades geométricas das seções mistas devem ser obtidas por meio da homogeneização teórica da seção formada pelo componente de aço e pela laje de concreto com sua largura efetiva, dividindo essa largura pela razão modular $\alpha_E = E/E_c$, onde E é o módulo de elasticidade do aço e E_c o módulo de elasticidade do concreto. A posição

da linha neutra deve ser obtida admitindo distribuição de tensões linear na seção homogeneizada.

Os efeitos de longa duração, causados pelos efeitos de fluência e retração do concreto, podem ser considerados, simplificadamente, multiplicando-se a razão modular por três para a determinação dos deslocamentos provenientes das ações permanentes e dos valores quase permanentes das ações variáveis.

Assim, como as propriedades geométricas, o momento de inércia da seção mista não pode ser considerado equivalente ao da seção em aço ou em concreto isolados. Para vigas mistas de alma cheia (perfil I) nas regiões de momentos positivos, o momento de inércia efetivo é dado por:

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\frac{\Sigma Q_{Rd}}{F_{hd}}} * (I_{tr} - I_a) \quad (2)$$

Onde:

I_a - Momento de inércia da seção do perfil de aço isolado;

I_{tr} - Momento de inércia da seção mista homogeneizada.

ΣQ_{Rd} - Somatório das forças resistentes de cálculo dos conectores de cisalhamento situados entre a seção de momento positivo máximo e a seção adjacente de momento nulo.

F_{hd} - Força de cisalhamento de cálculo entre os componentes de aço e a laje, igual ao menor valor entre $A_a * f_{yd}$ e $0,85 * f_{cd} * b * t_c$.

Para as vigas mistas contínuas e semicontínuas que apresentam momentos negativos, o momento de inércia efetivo é dado pela seção transversal formada pelo perfil de aço mais a armadura longitudinal contida na largura efetiva da laje de concreto.

5.1.4 Verificação ao momento fletor

5.1.4.1 Largura Efetiva

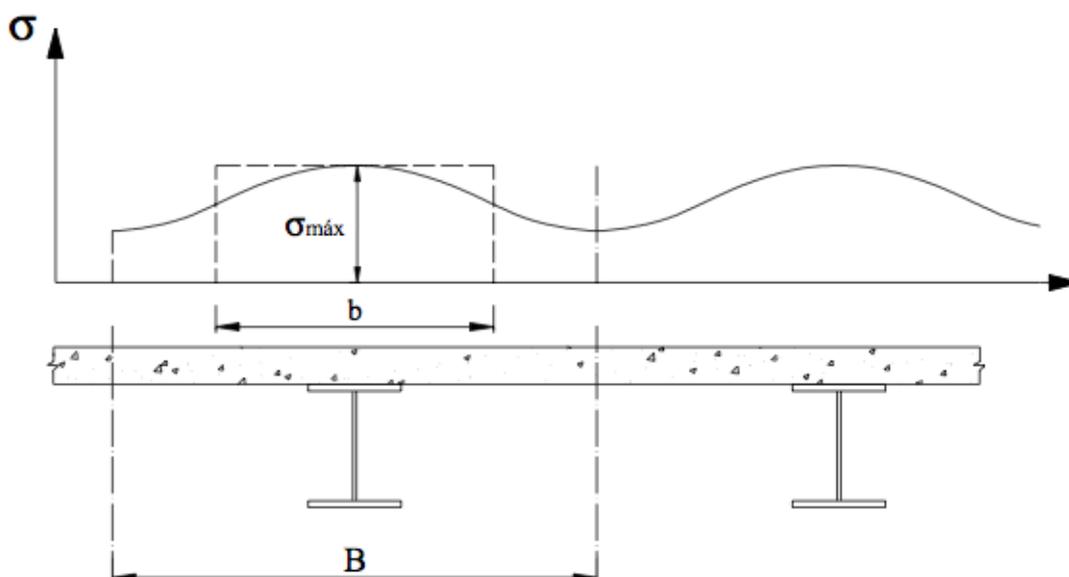
A distribuição das tensões na laje de concreto não é uniforme e sua largura total não deve ser considerada por completo na resistência da seção mista gerando

um efeito chamado "shearlag". Higaki (2009) afirma que a largura efetiva é uma medida fictícia que simula um estado em que a viga teria tensões uniformes, assim nessas condições a resistência ao momento fletor seria também constante por toda essa suposta extensão.

Com base na teoria da elasticidade, o cálculo da exata largura efetiva é um processo muito trabalhoso, o que inviabiliza seu uso em termos de projeto. Nas normas são abordados cálculos mais práticos para a determinação da largura efetiva levando em conto o efeito "shearlag" (ALVA, 2000).

Na Figura13 pode-se observar de maneira simplificada o efeito "shearlag".

Figura 13 - Distribuição das tensões longitudinais na laje - efeito "shearlag".



Fonte: (ALVA, 2000).

A NBR 8800:2008 determina o cálculo da largura efetiva como:

Vigas mistas biapoiadas

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

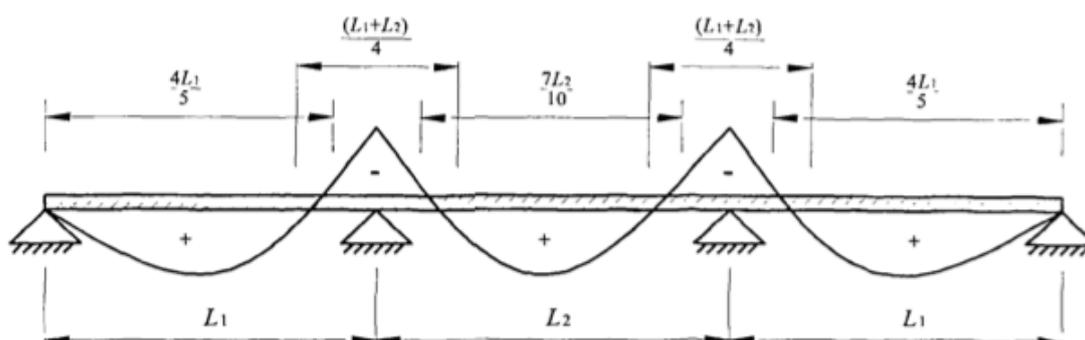
- 1/8 do vão da viga mista, considerando entre linhas de centro dos apoios;
- Metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- Distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

Vigas mistas contínuas e semicontínuas

As larguras efetivas podem ser determinadas conforme o caso de vigas simplesmente apoiadas, tomando-se em lugar dos vãos da viga as distâncias entre pontos de momento nulo. Admite-se, simplificada, a adoção dos seguintes valores para tais distâncias, ilustrados na Figura 14.

- Nas regiões de momento positivo:
 - 4/5 da distância entre apoios, para vãos extremos;
 - 7/10 da distância entre apoios, para vãos internos;
- Nas regiões de momento negativo:
 - 1/4 da soma de vãos adjacentes.

Figura 14 – Pontos de momento nulo em uma viga contínua ou semi contínua



Fonte: NBR 8800:2008

5.1.4.2 Resistência quanto a momentos positivos

Nesta pesquisa será abordado o método de determinação do momento fletor resistente de cálculo para o tipo de viga mista mais comum, as de alma cheia com $h/t_w \leq 3,76\sqrt{E/f_y}$. Essas vigas são consideradas compactadas e podem ser dimensionadas usando as propriedades plásticas da seção mista.

Na Figura 15, é apresentado a distribuição de tensões na interação parcial, a mais utilizada por razões econômicas, em que a NBR 8800:2008 se fundamenta para o cálculo do momento fletor resistente. No estudo de caso apresentado no capítulo 5 desta pesquisa, pode-se determinar o momento fletor resistente pelos cálculos:

Para o caso de viga mista de alma cheia com interação parcial a norma indica que as seguintes condições devem ser atendidas:

$$\Sigma Q_{Rd} < A_a * f_{yd} \quad e \quad (3)$$

$$\Sigma Q_{Rd} < 0,85 f_{cd} * b * t_c \quad (4)$$

A partir desta verificação, deve ser determinado o grau de interação da viga, η_i , que deve atender a seguinte expressão para perfis de aço com mesas de áreas iguais:

$$\eta_i = \frac{\Sigma Q_{Rd}}{F_{hd}} > 1 - \frac{E}{578 * f_y} (0,75 - 0,03 L_e) \geq 0,40 \quad \text{para } L_e \leq 25m; \quad (5)$$

Onde:

F_{hd} - força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje, igual ao menor valor entre $A_a * f_{yd}$ e $0,85 f_{cd} * b * t_c$;

L_e - comprimento do trecho de momento positivo (distância entre pontos de momento nulo, em metros, podendo ser tomado como igual a largura efetiva nas vigas contínuas e semicontínuas.

Atendendo essas condições, tem-se:

$$C_{cd} = \Sigma Q_{Rd} \quad (6)$$

$$C_{ad} = \frac{1}{2} (A_a * f_{yd} - C_{cd}) \quad (7)$$

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} \quad (8)$$

A plastificação da linha neutra da seção plastificada medida a partir do topo do perfil de aço pode ser determinada como:

- para $C_{ad} \leq A_{af} * f_{yd}$ - linha neutra na mesa superior

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{af} * f_{yd}} * t_f \quad (9)$$

- para $C_{ad} > A_{af} * f_{yd}$ - linha neutra na alma

$$y_p = t_f + h_w \left(\frac{C_{ad} - A_{af} * f_{yd}}{A_{aw} * f_{yd}} \right) \quad (10)$$

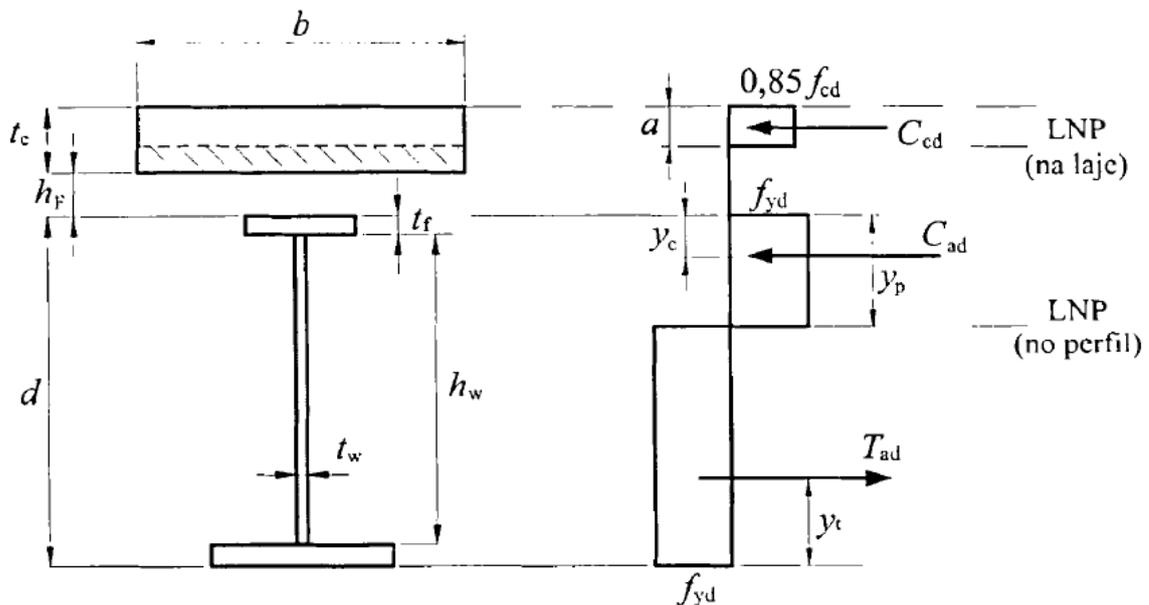
O momento fletor resistente de cálculo fica igual a:

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_f + d - y_t \right) \right] \quad (11)$$

Sendo a altura da parte comprimida igual a:

$$a = \frac{C_{cd}}{0,85 * f_{cd} * b} \quad (12)$$

Figura 15 – Distribuição de tensões em vigas mistas com interação parcial de alma cheia sob momento positivo ($h/t_w \leq 3,76 E/f_y$)



Fonte: NBR 8800:2008

5.1.4.3 Resistência quanto a momentos negativos

O perfil de aço combinado a seção da armadura longitudinal na largura efetiva da laje de concreto atuam combatendo o momento fletor negativo. Uma quantidade satisfatória de conectores de cisalhamento é necessária para que os esforços horizontais entre o perfil de aço e a laje de concreto sejam resistidos.

O perfil de aço deve atender algumas exigências da norma para que não sofra flambagem local na mesa, como a relação entre a largura e a espessura da

mesa comprimida que não pode ser superior a $0,38\sqrt{E/f_y}$, deve-se também obedecer a relação entre duas vezes a altura da parte comprimida da alma menos duas vezes o raio de concordância entre a mesa e a alma nos perfis laminados (NBR 8800:2008).

A força resistente de tração de cálculo nas barras da armadura longitudinal, denominada como T_{ds} , deve ser igual o produto da área da armadura longitudinal dentro da largura efetiva da laje de concreto, A_{st} , pela resistência a tração de cálculo do aço, f_{sd} .

Segundo a NBR 8800:2008, o momento fletor negativo resistente de cálculo para vigas compactas, quando $h/t_w \leq 3,76\sqrt{E/f_y}$, é representado pela Figura 16 e dado pela expressão a seguir:

$$M_{Rd}^- = T_{ds} * d_3 + A_{at} * f_{yd} * d_4 + A_{ac} * f_{yd} * d_5 \quad (13)$$

Dado:

A_{at} - área tracionada da seção do perfil de aço;

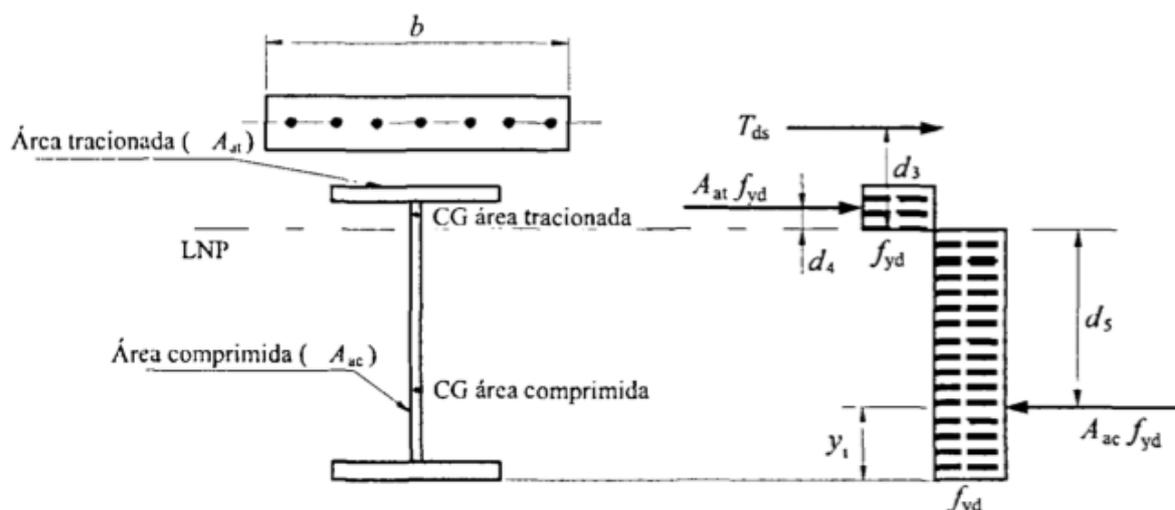
A_{ac} - área comprimida da seção do perfil de aço;

d_3 - distância do centro geométrico da armadura longitudinal à LNP;

d_4 - distância da força de tração;

d_5 - distância da força de compressão;

Figura 16 – Distribuição de tensões para momento fletor negativo



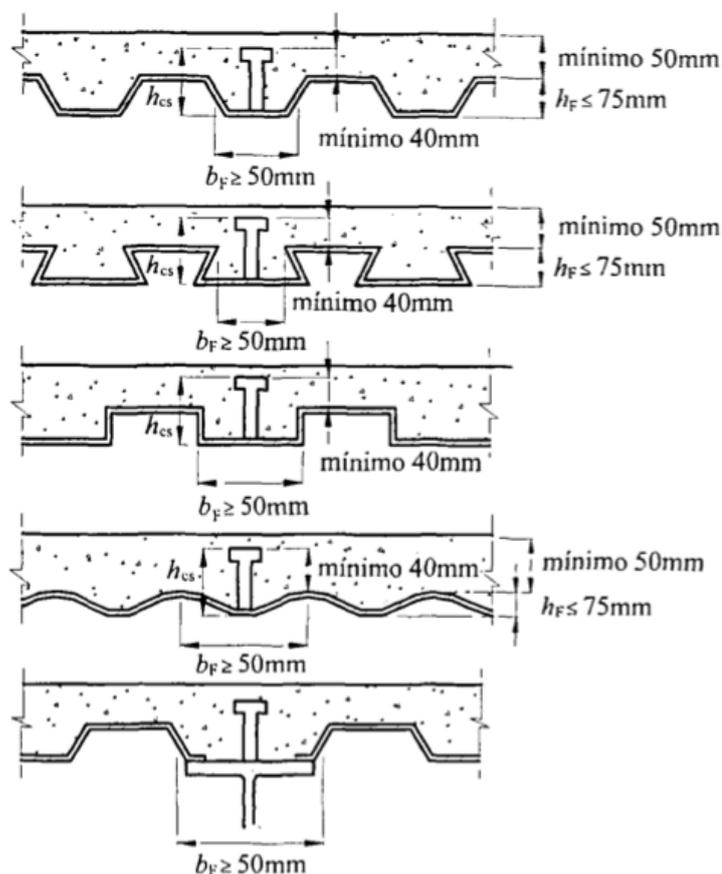
Fonte: NBR 8800:2008

5.1.5 Limitações para uso em lajes mistas

Segundo a NBR 8800:2008, para uma viga mista com laje de concreto com fôrma de aço incorporada é necessário obedecer as seguintes limitações (Figura 17):

- A altura h_f das nervuras da fôrma de aço deve ser igual ou inferior a 75 mm;
- A largura média b_f da mísula ou da nervura situada sobre o perfil de aço deve ser igual ou superior a 50 mm.
- A laje de concreto que for ligada ao perfil de aço por conectores tipo pino com cabeça devem ter diâmetro igual ou inferior a 19 mm.
- Depois de instalados, os conectores devem ter uma projeção acima do topo da fôrma igual ou superior a 40 mm;
- O cobrimento de concreto acima do topo da fôrma de aço deve ser igual ou superior a 50 mm.
- Os conectores podem ser soldados ao perfil de aço através da fôrma ou furando-a. Para esse primeiro caso, são necessários cuidados especiais para garantir a fusão completa do conector com o perfil.

Figura 17 – Lajes de concreto com fôrma de aço incorporada



Fonte: NBR 8800:2008

5.1.4 Conectores de Cisalhamento

A NBR 8800:2008 prevê conectores de cisalhamento dos tipos pino com cabeça e perfil U laminado ou formado a frio. Segundo essa norma, todos os tipos de conectores devem ficar completamente embutidos no concreto da laje, com cobrimento superior mínimo de 10 mm. Os conectores do tipo pino com cabeça devem ter, após a instalação, comprimento mínimo igual a 4 vezes o diâmetro, e atender rigorosamente ao estipulado na AWS D1.1 no que se refere a suas dimensões e sua ligação com o elemento de aço da viga mista.

De acordo com a NBR 8800:2008, o cálculo da força resistente do conector pino com cabeça é dado pelo menor dos valores seguintes:

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} * \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} * E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (14)$$

e

$$Q_{Rd} = \frac{R_g * R_p * A_{cs} * f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (15)$$

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} - área da seção transversal do conector;

f_{ucs} - resistência à ruptura do aço do conector;

E_c - módulo de elasticidade do concreto;

R_g - coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores, dado abaixo;

R_p - coeficiente para consideração da posição do conector, dado abaixo.

Deve-se tomar para o coeficiente R_g os seguintes valores:

- 1,00, para um conector soldado em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço; para qualquer número de conectores em uma linha soldados diretamente no perfil de aço; para qualquer número de conectores em uma linha soldados através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço e com relação b_f/h_f igual ou superior a 1,5;
- 0,85, (b1) para dois conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço; (b2) para um conector soldado através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço e com relação b_f/h_f inferior a 1,5;

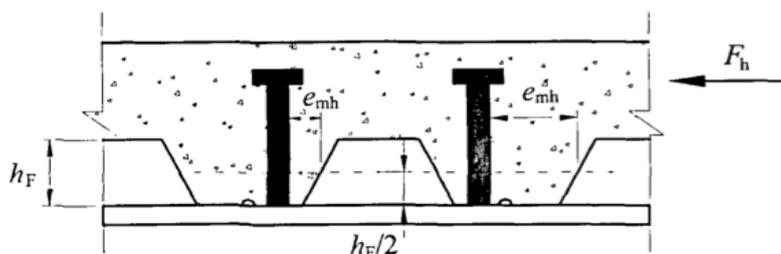
- 0,70, para três ou mais conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço.

Deve-se tomar para o coeficiente R_p os seguintes valores:

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

Onde e_{mh} é a distância da borda do fuste do conector à alma da nervura da fôrma de aço, medida à meia altura da nervura no sentido da força cortante que atua no conector, conforme Figura 18.

Figura 18 - Ilustração do valor a ser tomado para e_{mh}



Fonte: NBR 8800:2008

Em relação à quantidade de conectores que deverão ser utilizados, Coutinho (2013) menciona que no caso de vigas mistas contínuas, esses devem ser analisados 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 necessários para cada seção será a menor carga entre compressão e tração dividida pela força resistente do conector.

5.2 Lajes Mistas

A laje com forma de aço incorporada funciona como base para o concreto antes da cura e assim, deve sustentar isoladamente as ações permanentes e a sobrecarga de construção. Após a cura do concreto, a fôrma de aço constitui a armadura positiva da laje desenvolvendo seu comportamento misto. A aderência natural entre o aço e o concreto não é considerada efetiva para o comportamento misto, pois para isso a fôrma deve apresentar reentrâncias e saliências, além dos conectores de cisalhamento para que o estado misto seja garantido.

Neste item serão descritos os procedimentos de cálculo para dimensionamento de lajes mistas segundo a NBR 8800:2008. Devem ser considerados os estados limites últimos e os de serviço.

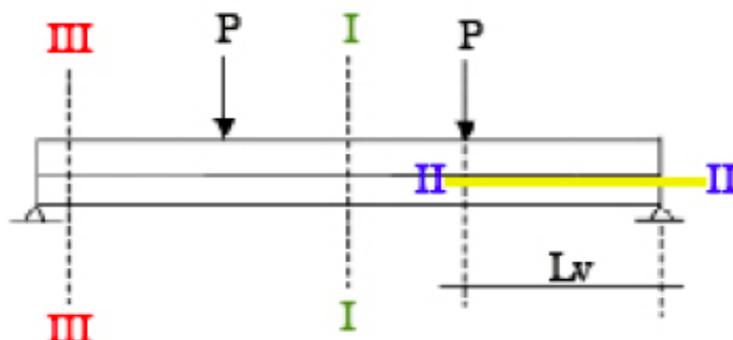
Os estados limites últimos englobam a resistência ao momento fletor, o cisalhamento longitudinal, o cisalhamento vertical e a punção. A resistência de lajes mistas deve ser suficiente para que possam suportar as cargas de cálculo aplicadas, assegurando-se que nenhum estado limite último seja atingido.

Os estados limites de serviço englobam a fissuração do concreto e o deslocamento vertical de lajes mistas. Estes dois estados limites devem ser verificados na situação após a cura do concreto.

5.2.1 Estados limites últimos

A resistência de lajes mistas deve ser suficiente para que possam suportar as cargas de cálculo aplicadas, assegurando-se que nenhum estado limite último seja atingido. A laje mista pode sofrer colapso de três formas diferentes, como ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Modos de colapso no estado limite último da laje mista de aço e concreto.



Fonte: Lima (2009)

- Seção crítica I – Colapso por flexão e por isso deve ser verificada a resistência ao momento fletor.
- Seção crítica II – Colapso por cisalhamento longitudinal. A carga máxima na laje é determinada pela resistência ao cisalhamento longitudinal, não sendo possível atingir-se a resistência última ao momento fletor.
- Seção crítica III – Colapso por cisalhamento vertical.
- Punção – Este estado limite pode ser crítico se o perímetro da área carregada e a espessura da laje forem pequenos e se a carga for muito elevada.

Para este estudo será exposto somente a verificação quanto ao momento fletor, porém as outras verificações quanto os outros tipos de colapso podem ser observadas na NBR 8800:2008, Anexo Q.

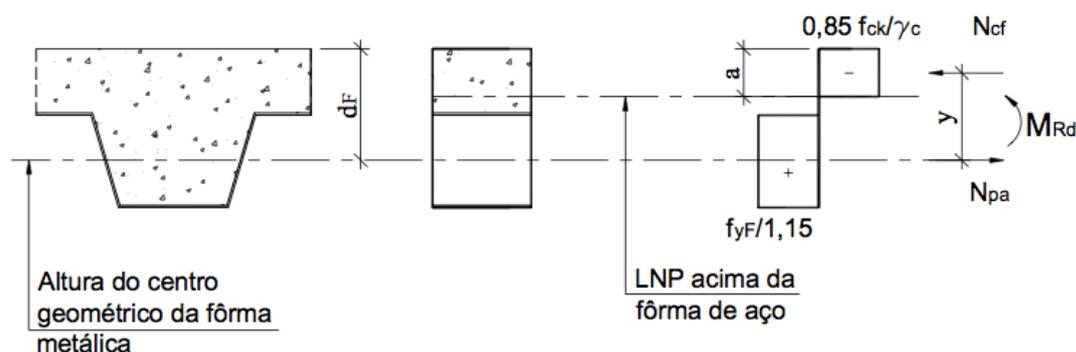
5.2.1.1 Resistência ao momento fletor

De acordo com a NBR 14323:2003, a resistência de cálculo ao momento fletor deverá ser calculada conforme as indicações da NBR 6118:2008. Para isso deve-se fazer os devidos ajustes lembrando que a fôrma de aço é parte integrante da laje e atuará como uma armadura positiva resistindo à tração. Nas regiões de momentos negativos, a fôrma de aço apenas terá contribuição resistindo aos esforços de compressão somente se a laje for contínua sobre os apoios, ou se

estiver devidamente ancorada na mesa superior da viga por meio de conectores tipo pino com cabeça.

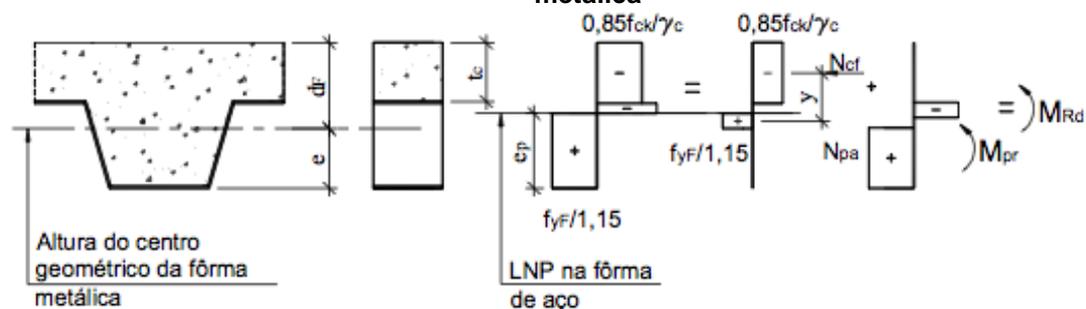
O cálculo para a resistência ao momento fletor em análise plástica deve ser realizado pelas seguintes expressões, sendo a primeira quando a linha neutra está acima da face superior da fôrma de aço e a segunda abaixo (Figura 20 e 21).

Figura 20 - Distribuição de tensões para momento positivo – linha neutra plástica acima da fôrma metálica



Fonte: NBR 8800:2008

Figura 21 – Distribuição de tensões para momento positivo – linha neutra plástica na fôrma metálica



Fonte: NBR 8800:2008

$$M_{Rd} = N_{pa}(d_F - 0,5 * a) \quad (16)$$

$$M_{Rd} = N_{cf} * y + M_{pr} \quad (17)$$

Onde:

$$N_{pa} = A_{F,ef} * f_{yFd} \quad (18)$$

$A_{F,ef}$ - área da seção efetiva da fôrma (correspondente a 1000 mm), determinada desprezando-se a largura das mossas na seção transversal, a menos que se demonstre por meio de ensaios que uma área maior possa ser utilizada;

d_f - distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma;

a - altura do bloco de compressão do concreto, dado por:

$$a = \frac{N_{pa}}{0,85 * f_{cd} * b} \quad (19)$$

b - é a largura unitária da laje, tomando igual a 1000 mm;

$$y = h_t - 0,5 * t_c - e_p + (e_p - e) * \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \quad (20)$$

t_c - altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

h_t - altura total da laje, incluindo a fôrma e o concreto;

e - distância do centro geométrico da área efetiva da fôrma à sua face inferior;

e_p - distância da linha neutra plástica da seção efetiva da fôrma

M_{pr} - momento de plastificação da fôrma de aço, reduzido pela presença da força axial, dado por:

$$M_{pr} = 1,25 * M_{pa} * \left(1 - \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \right) \leq M_{pa} \quad (21)$$

M_{pa} - momento de plastificação da fôrma de aço, considerando sua seção efetiva, dividido pelo coeficiente de ponderação da resistência γ_{al} .

$$N_{cf} = 0,85 * b * t_c * f_{cd} \quad (22)$$

5.2.2 Estado limite de serviço

5.2.2.1 Fissuração do concreto

De acordo com a NBR 8800:2008, para lajes calculadas como simplesmente apoiadas devem ser colocadas armaduras nas duas direções, para combater os efeitos de retração e variação de temperatura, com área não inferior a 0,1% da área de concreto acima da face superior da fôrma. Essa armadura deve ser colocada preferencialmente a 20 mm abaixo do topo da laje. É necessário atenção especial

quanto à possibilidade de fissuração da laje nos locais onde possa haver continuidade estrutural, como por exemplo, nas ligações de vigas secundárias com vigas principais e em torno dos pilares. Caso o ambiente seja bastante agressivo, é comum que a laje seja calculada como contínua e o controle de fissuração, nesse caso, seja adequadamente verificado pela norma ou especificação apropriada.

5.2.2.2 Deslocamento vertical

Segunda a mesma norma, o deslocamento vertical de lajes mistas de aço e concreto não pode ser maior que $L_f/350$, considerando apenas o efeito das ações variáveis, onde L_f é o vão teórico da laje na direção das nervuras.

5.2.3 Disposições construtivas

Para que um projeto de laje mista seja considerado satisfatório deve-se seguir as recomendações e disposições construtivas recomendadas pela norma brasileira. Estas indicações foram propostas a partir de experiências de projeto, estudos e ensaios. De acordo com a NBR 8800:2008 as seguintes disposições construtivas precisam ser obedecidas:

- A espessura de concreto sobre a fôrma deve ser no mínimo 50 mm;
- A dimensão máxima característica do agregado graúdo não deve exceder os seguintes valores:
 - $0,40t_c$, onde t_c é a altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;
 - $b_o/3$ onde b_o é a largura média das nervuras para fôrmas trapezoidais e a largura mínima das nervuras para fôrmas reentrantes;
 - 30 mm;
- A armadura adicional necessária para a resistência da laje ao momento positivo e a armadura necessária para o momento negativo devem obedecer às prescrições da NBR 6118:2003 para o concreto de densidade;

- O comprimento mínimo de apoio deve ser o necessário para evitar que se atinjam os estados-limites correspondentes, tais como enrugamento da alma da fôrma de aço ou esmagamento do apoio. Entretanto, não pode ser inferior a 75 mm para apoio em aço ou concreto e 100 mm para apoio em outros materiais. Nas extremidades da fôrma, esses valores podem ser reduzidos para 50 mm e 70 mm, respectivamente.

6. ESTUDO DE CASO

6.1 Pré-dimensionamento do pórtico principal de um edifício exemplo

Para melhor compreensão e aplicação do conteúdo exposto, este capítulo será dedicado ao estudo de caso de uma edificação concebida com sistema estrutural em aço, concreto armado e outra mista aço-concreto com o objetivo de permitir a previsão e estimativa dos custos de cada sistema estrutural.

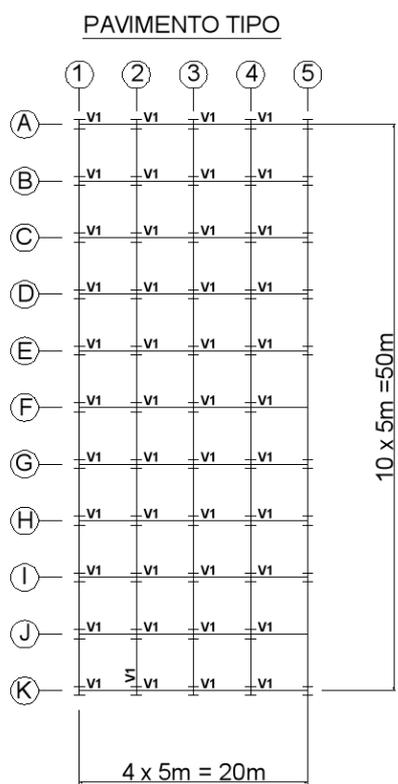
De acordo com a revisão da NBR 6118 (2008), devem ser consideradas todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em questão, levando-se em conta os possíveis estados limites últimos e os de serviço. Em seguida, passa-se ao pré-dimensionamento dos elementos estruturais principais: vigas, lajes e pilares. Vale salientar que, nessa fase, normalmente se considera a estrutura submetida apenas a esforços verticais.

Não existem normas que definam como deve ser feito o pré-dimensionamento e, portanto, esses cálculos são baseados em recomendações práticas. Porém, nas normas são indicadas as dimensões mínimas dos elementos para cada tipo de sistema estrutural.

Conhecendo-se as dimensões das partes constituintes da estrutura é necessário verificar se os esforços solicitantes serão menores que os esforços resistentes. É importante ressaltar também, que uma estrutura deve ser calculada no estado limite último e que essa funcionará no estado limite de utilização, por isso que são considerados os coeficientes de segurança.

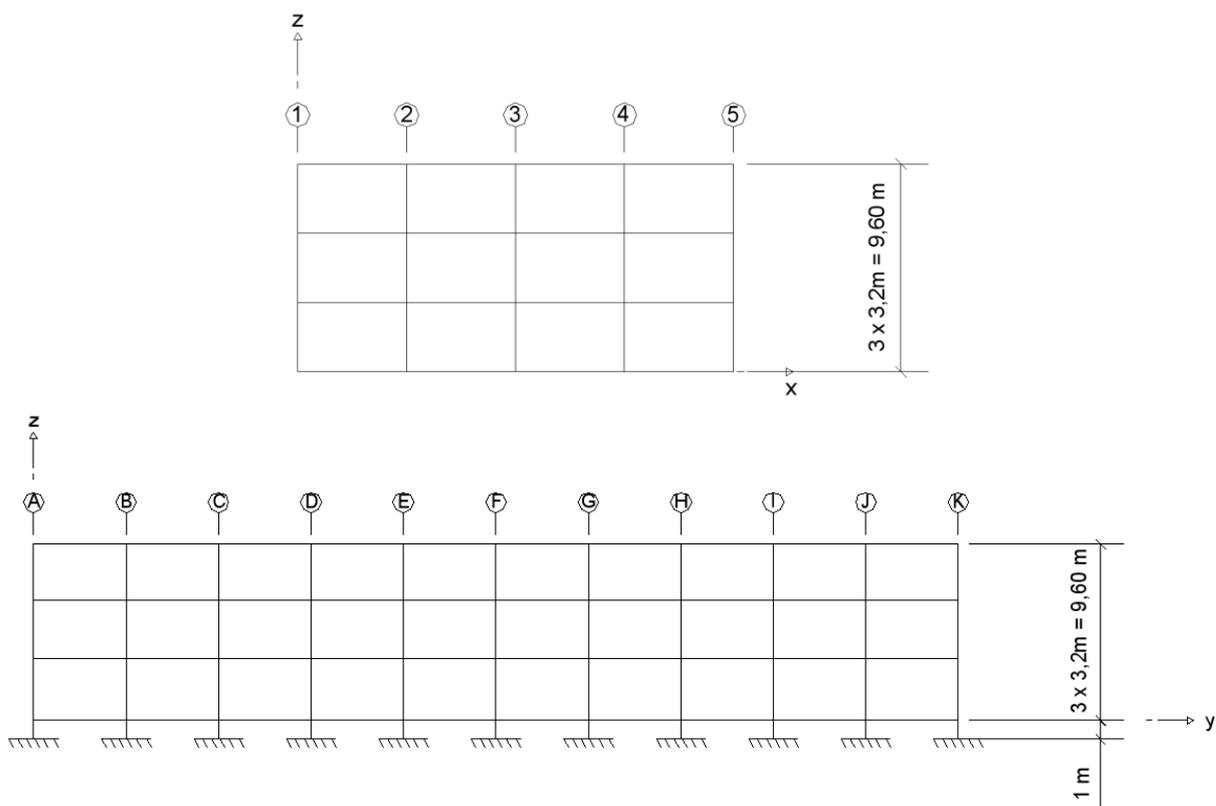
Para o estudo de caso, será pré-dimensionado os elementos estruturais vigas lajes e pilares das alternativas de métodos estruturais. O estudo de caso será o exemplo de um edifício comercial de três pavimentos como ilustrado a seguir.

Figura 22 – Planta baixa do pavimento tipo



Fonte: Autora

Figura 23 – Cortes do edifício exemplo



Fonte: Autora

CÁLCULO DAS SOLICITAÇÕES

Segundo a NBR 6120:2000, os carregamentos provenientes da laje serão:

- Peso próprio – 2,5 KN/m²;
- Forro/revestimento/serviços: 1,5 KN/m²;
- Sobrecarga nos pavimentos: 2 KN/m²;
- Sobrecarga na cobertura: 0,5 KN/m²;

As combinações normais das solicitações para estados limites últimos a serem utilizadas são baseadas na NBR 8681:2003, e são calculadas em função dos valores característicos das ações permanentes G e variáveis Q:

$$F_d = \Sigma \gamma_{gi} G_i + \gamma_{q1} Q_1 + \Sigma \gamma_{qi} \psi_{0j} Q_j \quad (23)$$

Onde:

Q_1 - ação variável de base (ou principal) para a combinação estudada;

Q_j - ações variáveis que atuam simultaneamente a Q_1 e que têm efeito desfavorável;

γ_g, γ_q - coeficientes de segurança parciais aplicados às cargas;

ψ_0 - fator de combinação que reduz as ações variáveis para considerar a baixa probabilidade de ocorrência simultânea de ações de distintas naturezas com seus valores característicos.

Segundo a NBR 8681:2003, para uma edificação com as características do exemplo deste trabalho:

- $\gamma_g = \gamma_q = 1,4$;
- $\psi_0 = 0,5$ quando aplicado às ações acidentais;
- $\psi_0 = 0,5$ quando aplicado às ações do vento;

Nesta edificação todas as vigas serão biapoiadas e existe apenas uma ação acidental (sobrecarga). O cálculo para a combinação que inclui todas as ações decorrentes do uso da estrutura previstas nos pavimentos é:

$$F_d = 1,4(2,5 + 1,5) + 1,4(2,0)$$

$$F_d = 8,4 \text{ KN/m}^2$$

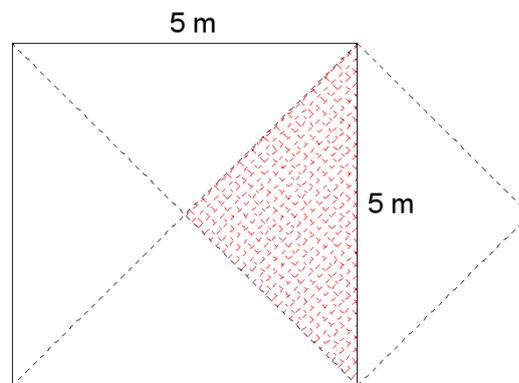
As solicitações de cálculo para a cobertura é:

$$F_d = 1,4(2,5 + 1,5) + 1,4(0,5)$$

$$F_d = 6,3 \text{ KN/m}^2$$

Para calcular o carregamento distribuído do pórtico principal é necessário analisar a área de influência para cada laje, essa área é demonstrada na Figura 24 abaixo:

Figura 24 – área de influência do carregamento distribuído para cada laje



Fonte: Autora

Sendo assim, a área de influência é igual a $12,5 \text{ m}^2$.

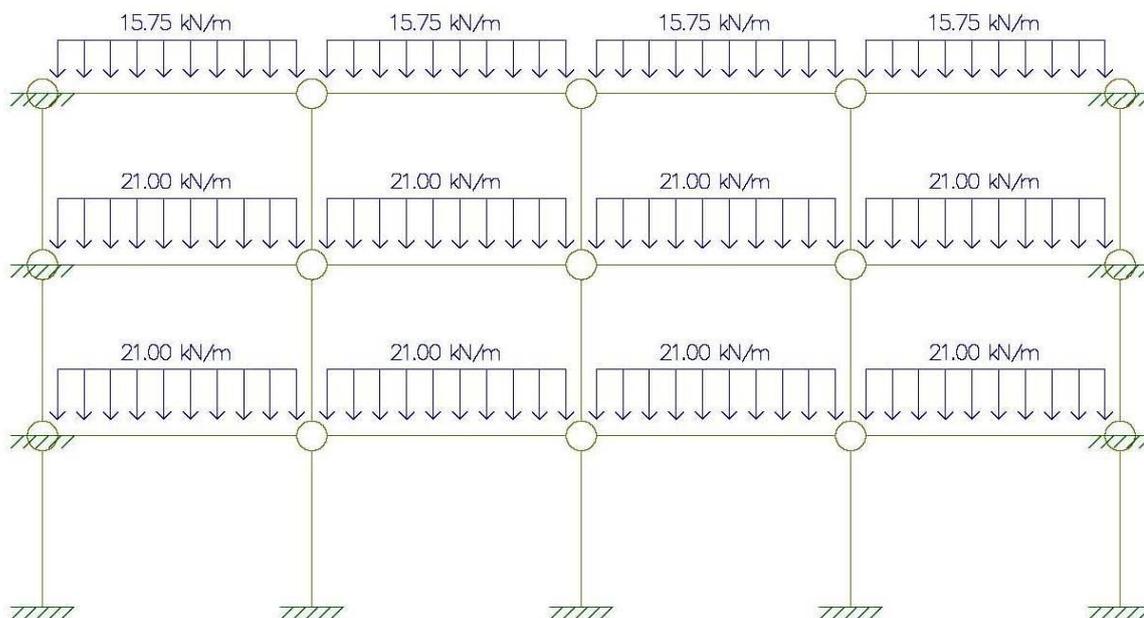
O carregamento nesse pórtico principal poderá ser calculado multiplicando as solicitações de cálculo pela área de influência:

$$F_{total} = 8,4 * 12,5 = 105 \text{ KN}$$

Divide-se esse resultado pelo número de apoios no pórtico principal, 5, sendo então o carregamento distribuído nos pavimentos e na cobertura iguais a 21 KN/m e 15,75 KN/m, respectivamente.

Com os esforços já determinados, foi utilizado o software Ftool, que é um programa de cálculo estático e dinâmico de estruturas planas. O software permitiu a determinação de diagramas de esforço cortante, esforço axial e momento fletor deste edifício exemplo.

Figura 25 – Carregamento distribuído para o pórtico principal da edificação

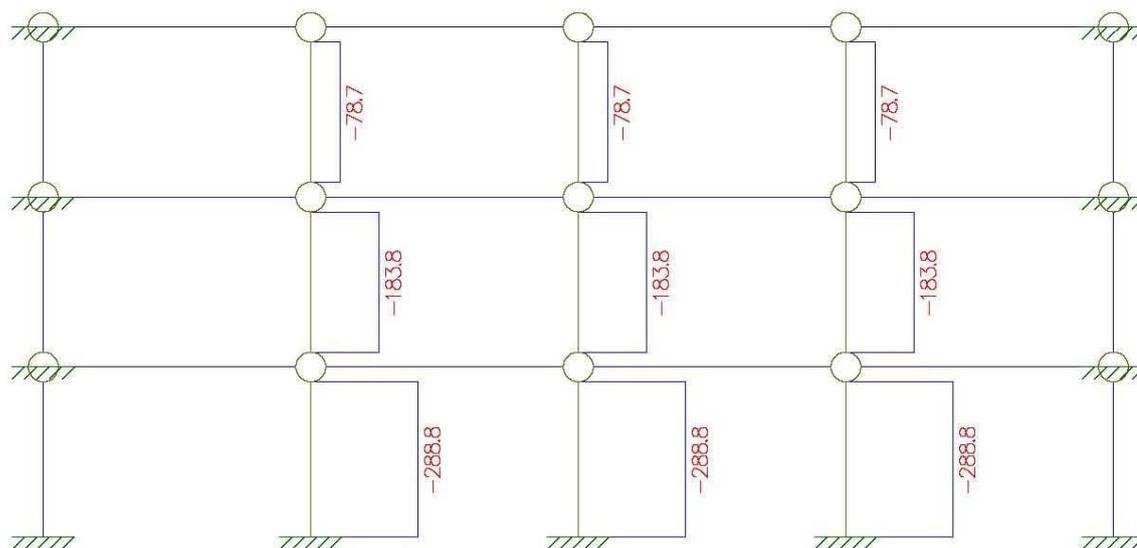


Fonte: Autora

Carregamento distribuído nos pavimentos: 21 kN/m

Carregamento distribuído na cobertura: 15,75 kN/m

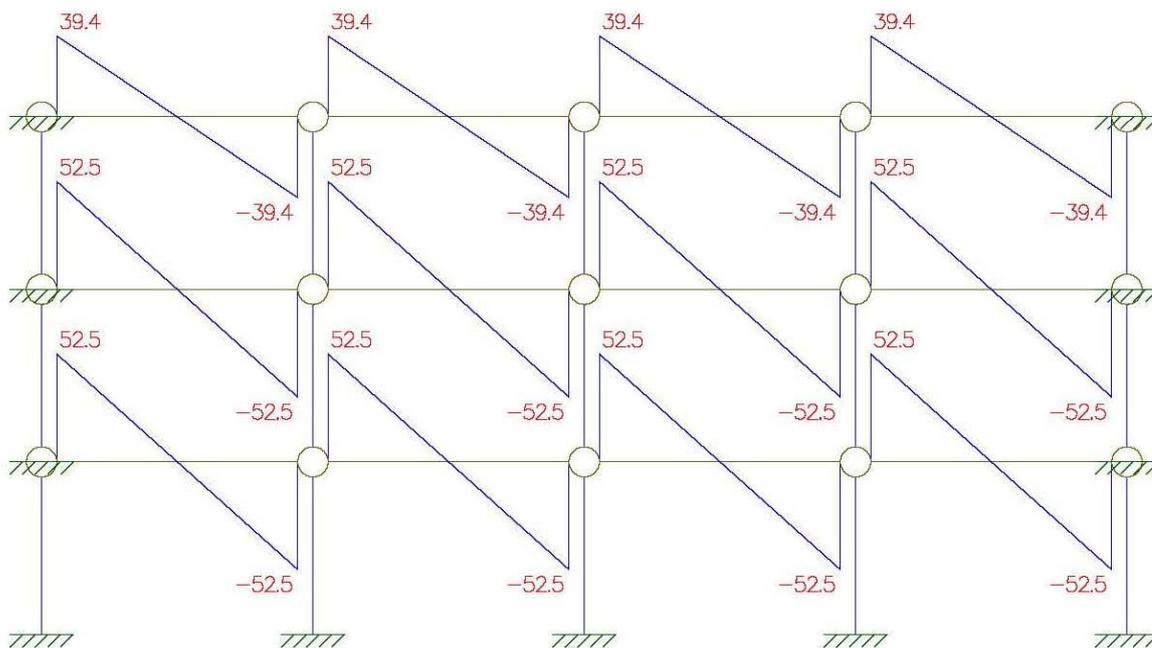
Figura 26 – Diagrama do esforço normal (DEN)



Fonte: Autora

Maior esforço normal negativo (N⁻) : - 288,8 kN

Figura 27 – Diagrama do esforço cortante (DEC)

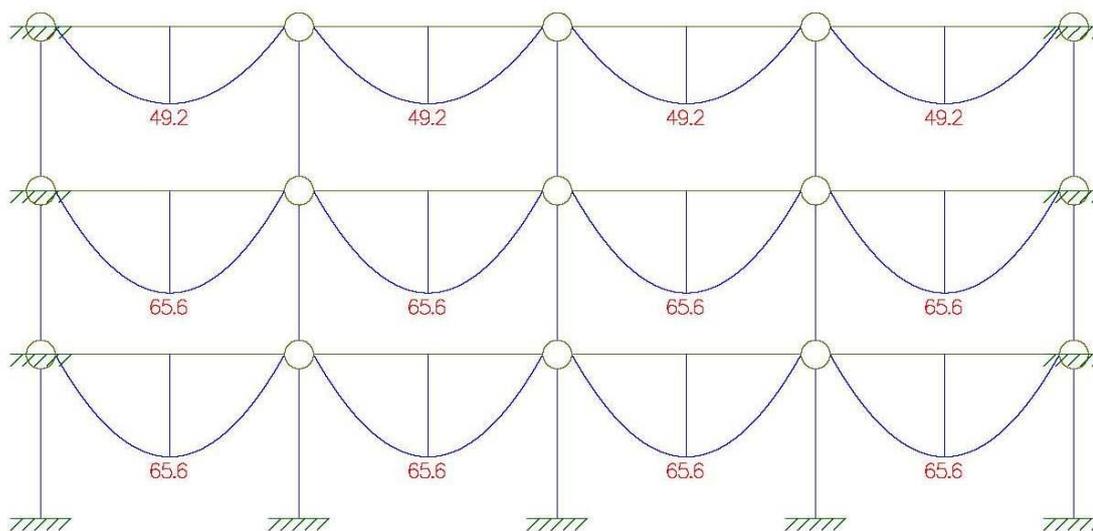


Fonte: Autora

Maior esforço cortante positivo (V^+) : 52,5 KN

Maior esforço cortante negativo (V^-) : - 52,5 KN

Figura 28 – Diagrama do momento fletor (DMF)



Maior momento fletor positivo (M^+) : 65,6 KN.m

Os projetistas de estruturas normalmente seguem uma padronização no que diz respeito às dimensões das peças e, para isso, seguem algumas indicações que advêm dos critérios de pré-dimensionamento estrutural. Essas diretrizes auxiliam no processo de elaboração do projeto.

Os resultados do dimensionamento dos elementos estruturais relativos ao método construtivo em concreto, aço e misto aço-concreto, calculados no capítulo 9 - Anexos, estão indicados respectivamente na Tabela 2.

Para as vigas metálicas e mistas aço-concreto foram considerados perfis tipo I do catálogo da Açominas Gerdau. No caso dos pilares em sistemas estruturais em aço e mistas aço-concreto foi adotado o perfil circular tubular 101,6 x 5,6mm (13,3 Kgf/m), do catálogo de tubos estruturais da Vallourec & Mannesmann Tubes – V&M do Brasil. Já para a laje *steel deck* o perfil de aço considerado foi o do catálogo da empresa Metform com espessura de 1,25 mm, aço ZAR-280.

Tabela 2– Dimensionamento dos elementos estruturais

Elementos	Concreto Armado	Metálica	Mista aço-concreto
Vigas	20 x 50 cm	W 360 x 32,9 kgf/m	W 150 x 24,0 kgf/m
Pilares	20 x 45 cm	$\varnothing = 101,6 \text{ mm}$	$\varnothing = 101,6 \text{ mm}$
Lajes	H=15 cm	H=15 cm	$h_f = 7,5 \text{ e } d = 7,5 \text{ cm}$ H = 15 cm
Conectores de Cisalhamento	-	-	$\varnothing = 15,9 \text{ mm}$

Para todas as alternativas optou-se por utilizar a mesma resistência de concreto em todos os elementos estruturais igual a 35 MPa.

6.2 Quantitativos

Antes de estimar o custo do edifício-exemplo para as três diferentes alternativas de sistemas estruturais, deve-se calcular os volumes de concreto e/ou peso do aço dos respectivos elementos estruturais. A edificação conta com 282 vigas, 3 lajes e 55 pilares em cada pavimento, e para o caso da estrutura mista aço concreto, cada viga necessitará de 9 conectores tipo pino com cabeça, sendo assim 2538 conectores ao todo.

Para os elementos em concreto armado deve-se contabilizar também os custos com as armaduras que foram consideradas para lajes 22 kg/m², vigas 150 kg/m³ e pilares 120 kg/m³. Esses índices de armadura foram considerados de acordo com o mesmo gerador de preços utilizado para o levantamento de custos, o CYPE Ingenieros. O tipo de aço da armadura será diferente para cada elemento estrutural e será exposto nas descrições nas tabelas das planilhas orçamentárias.

Tabela 3 – Consumo de materiais – Estrutura em concreto armado

Elemento	Estrutura em Concreto Armado		
	Volume de concreto (m ³)	Área de concreto (m ²)	Aço (kg)
Vigas	141	28,2	21.150
Lajes	450	3.000	66.000
Pilares	47,52	4,95	5.702,4
Total	638,52	3.033,15	92.852,4

Em uma construção que se utiliza de processos construtivos convencionais em concreto armado, existe o desperdício de alguns materiais. Segundo Inaba (2010), este desperdício pode chegar a 25% do peso do total do edifício. Considerando esse fator tem-se que o consumo de materiais para a estrutura em concreto será de 176,25 m³ para as vigas e 562,5 m³ para as lajes e 59,4 m³ para os pilares. Desta forma o consumo total de concreto para a estrutura em concreto armado será de 798,15 m³.

A Tabela 3 ilustra o consumo de materiais na estrutura metálica, onde as lajes são maciças de concreto, as vigas constituídas de perfis I W 360 x 32,9, com massa

linear de 32,9 kg/m e os pilares formados por perfis tubulares com $\varnothing = 101,6$ mm, e massa linear de 13,3 kg/m.

Tabela 4 – Consumo de materiais – Estrutura metálica

Estrutura Metálica	
Elemento	Peso do perfil (kg)
Vigas	46.389
Lajes	-
Pilares	7.022,4
Total	53.411,4

*Obs: A laje será maciça, portanto o consumo de concreto e de aço para armadura será igual ao da Tabela 3.

Na laje mista foi dimensionada a fôrma de altura 7,5 cm com 7,5 cm de espessura de concreto acima das nervuras, assim sendo uma laje de 15 cm ao todo. Em relação as vigas mistas, foram utilizados perfis W150 x 24,0 (Massa linear igual a 24 kg/m) da empresa Açominas Gerdau para compor o sistema, com o auxílio de conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça com diâmetro de 15,9mm para atuar como parte essencial do comportamento misto da viga. Os pilares mistos foram pré-dimensionados com o mesmo perfil da estrutura metálica com o diferencial que este será preenchido por concreto.

É importante salientar que neste sistema estrutural misto aço-concreto foi considerado interação parcial entre a laje de concreto e o perfil de aço da viga, para o cálculo dos conectores de cisalhamento.

Tabela 5 – Consumo de materiais – Estrutura mista aço-concreto

Estrutura Mista aço-concreto			
Elemento	Peso do perfil (kg)	Fôrma de aço incorporada (m²)	Quantidade (Unid.)
Vigas	33.840	-	-
Lajes	-	3.000	-
Pilares	7.022,4	-	-
Conectores	-	-	2.538
Total	40.862,4	3.000	2.538

6.3 Levantamento de custos

Para estimar os preços das três alternativas construtivas do edifício-exemplo dado, foi pesquisado cada elemento estrutural no Gerador de Preços para Construção da CYPE Ingenieros – Empresa Espanhola de Software Técnico com certificação ISO 9001:2008 – que compõe valores para diversos tipos de métodos construtivos. Apenas no caso do pilar misto que seu preço foi complementado por uma composição do SINAPI, por não ter sido encontrado este tipo de pilar no CYPE Ingenieros. É importante ressaltar que todos os preços que serão dados a seguir, já apresentam o custo da mão de obra necessária incluso.

Estes valores são um preço de referência, no qual se tem em conta uma série de condicionantes que se podem conhecer antecipadamente à realização de uma obra. Existem outras condicionantes que não se podem prever à priori, pois dependem de relações particulares entre o fabricante e o construtor, como descontos, formas de pagamento, fidelidade, incrementos de descontos por volume de compra, etc.

Tabela 6 – Planilha Orçamentária – Estrutura em concreto armado

ITEM	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UN	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
Estrutura em Concreto Armado						R\$683.534,71
1.	EHL010	Laje maciça de concreto armado, horizontal, altura 15 cm, realizada com concreto C35 classe de agressividade ambiental II e tipo de ambiente urbano, brita 1, consistência S100 dosado em central, e concretagem com grua, e aço CA-50, quantidade 22 kg/m ² ; montagem e desmontagem do sistema de fôrmas de madeira; altura livre de piso de entre 3 e 4 m. Sem incluir repercussão de pilares.	m ²	3000	R\$194,29	R\$582.870,00
2.	EHV010	Viga alta de concreto armado, realizada com concreto C35 classe de agressividade ambiental II e tipo de ambiente urbano, brita 1, consistência S100 dosado em central, e concretagem com grua, e aço CA-50, quantidade 150 kg/m ³ ; montagem e desmontagem do sistema de fôrmas de madeira, em piso de entre 3 e 4 m de altura livre.	m ²	28,2	R\$1.248,74	R\$35.214,47
3.	EHS010	Pilar de seção retangular ou quadrada de concreto armado, realizado com concreto C35 classe de agressividade ambiental II e tipo de ambiente urbano, brita 1, consistência S100 dosado em central, e concretagem com grua, e aço CA-50, quantidade 120 kg/m ³ ; montagem e desmontagem do sistema de fôrmas de chapas metálicas reutilizáveis, entre 3 e 4 m de altura livre e 20x45 cm de seção média.	m ³	47,52	R\$1.377,32	R\$65.450,25

Tabela 7 – Planilha Orçamentária – Estrutura metálica

ITEM	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UN	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
Estrutura Metálica						R\$799.186,17
1.	EHL010	Laje maciça de concreto armado, horizontal, altura 15 cm, realizada com concreto C35 classe de agressividade ambiental II e tipo de ambiente urbano, brita 1, consistência S100 dosado em central, e concretagem com grua, e aço CA-50, quantidade 22 kg/m ² ; montagem e desmontagem do sistema de fôrmas de madeira; altura livre de piso de entre 3 e 4 m. Sem incluir repercussão de pilares.	m ²	3000	R\$194,29	R\$582.870,00
2.	EAV010	Aço A 572 Grau 50 em vigas, com peças simples de perfis laminados a quente das séries IPN, IPE, UPN, HEA, HEB ou HEM com ligações soldadas.	kg	46389	R\$4,05	R\$187.875,45
3.	EAS010	Aço A 572 Grau 50 em pilares, com peças simples de perfis laminados a quente com ligações soldadas.	kg	7022,4	R\$4,05	R\$28.440,72

Tabela 8 – Planilha Orçamentária – Estrutura mista aço-concreto

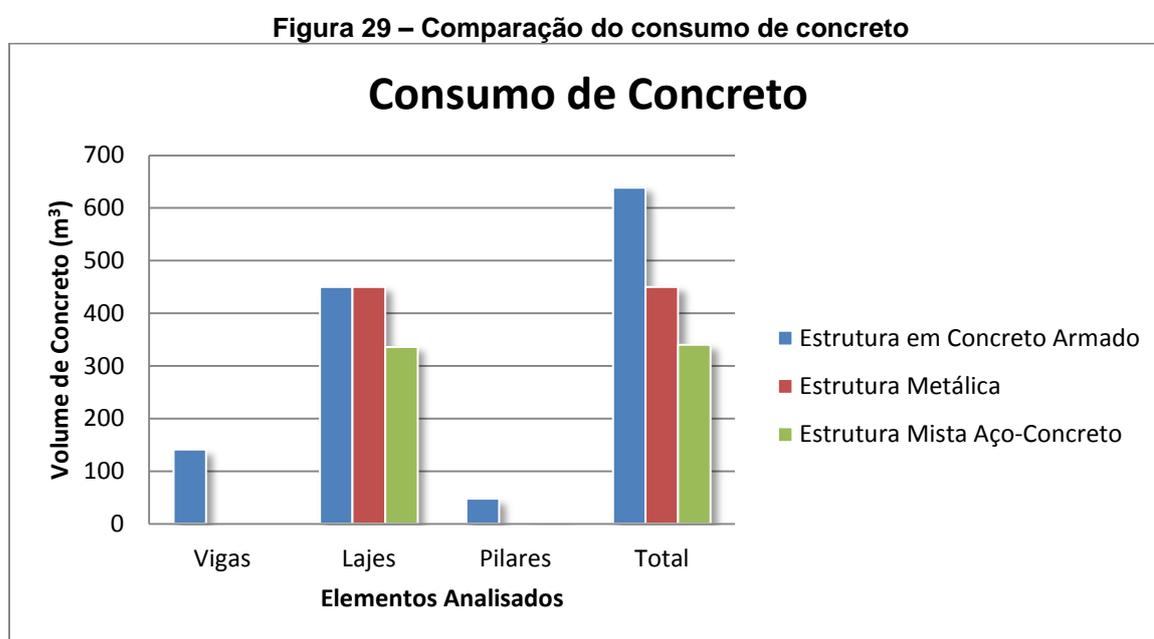
ITEM	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UN	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
Estrutura Mista Aço-Concreto						R\$569.076,85
1.	EHX011	Laje mista, altura 15 cm, com chapa colaborante de aço galvanizado de 1,25 mm de espessura, 75 mm de altura e 274 mm de distância entre-eixos, e concreto armado realizado com concreto C35 classe de agressividade ambiental II e tipo de ambiente urbano, brita 1, consistência S100 dosado em central, e concretagem com grua, volume total de concreto 0,112 m ³ /m ² , aço CA-50, com uma quantidade total de 1 kg/m ² , e tela eletrossoldada Q 92 de aço CA-60.	m ²	3000	R\$122,63	R\$367.890,00
2.	EXV010	Aço A 572 Grau 50 em vigas mistas, peças simples mais conectores, estrutura soldada.	kg	33840	R\$4,54	R\$153.633,60
3.	EHX020	Conector de 11 cm de altura, fixado com pregos de disparo sobre vigas metálicas em lajes mistas de 11 cm de altura mínima.	Un	2538	R\$6,90	R\$17.512,20
4.	EAS010	Aço A 572 Grau 50 em pilares, com peças simples de perfis laminados a quente com ligações soldadas.	kg	7022,4	R\$4,05	R\$28.440,72
5.	79140 - SINAPI	Concreto estrutural usinado bombeado Fck =35 Mpa, com adição de 8 & Agrave; 10% de microssílica (incluindo lançamento, aplicação e adensamento –Preenchimento do pilar	m ³	3,82	R\$418,74	R\$1.600,33

7. ANÁLISE COMPARATIVA

Para o edifício-exemplo será comparado o consumo de materiais e o custo total da estrutura para as três alternativas construtivas.

7.2 Consumo de concreto

Visando facilitar a análise comparativa do consumo de concreto segue a Figura 29.

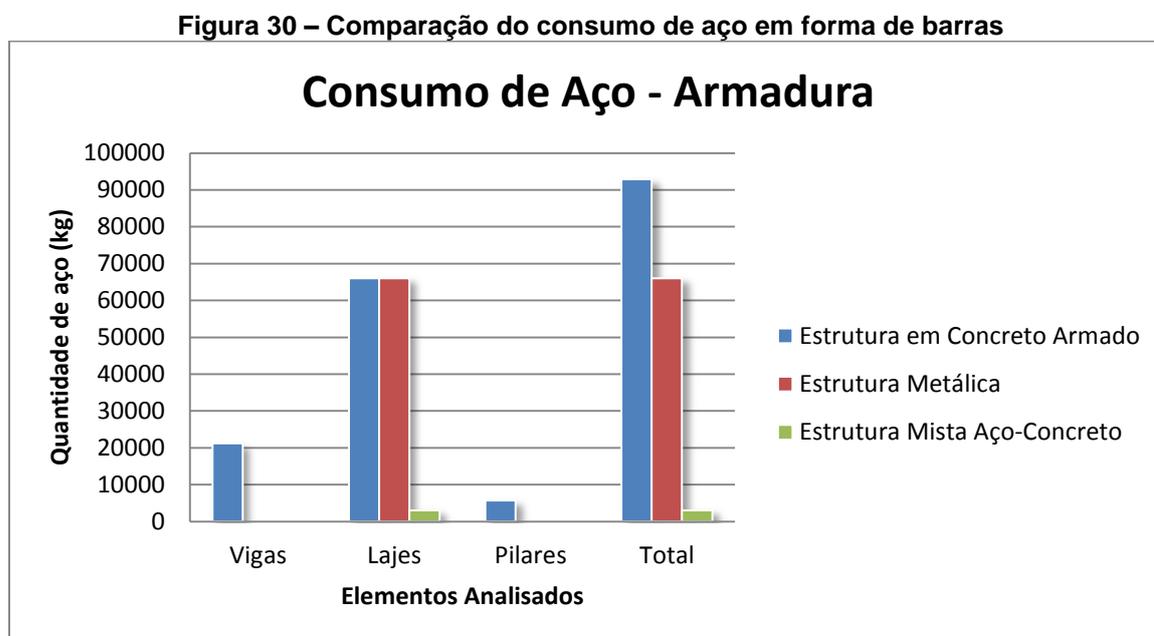


Fonte: Autora

Através da ilustração, constata-se que o consumo de concreto para o edifício estruturado em concreto armado foi superior ao apresentado pelos edifícios estruturados em elementos mistos e metálicos. Em termos percentuais, pode-se inferir que o volume de concreto utilizado para o edifício estruturado com elementos mistos foi 53,2% do volume de concreto utilizado no edifício de concreto armado. Já no caso da edificação em aço o volume de concreto utilizado foi 70,5% do volume do mesmo material utilizado na estrutura em concreto armado. Esse valor indica que a laje maciça de concreto dimensionada para a estrutura metálica exerce um grande papel no consumo de concreto das estruturas em concreto armado e na metálica.

7.3 Consumo de aço – Barras e Perfis

A Figura 30 é ilustrada a seguir a fim de facilitar a análise do consumo de aço estrutural em forma de barras.



Fonte: Autora

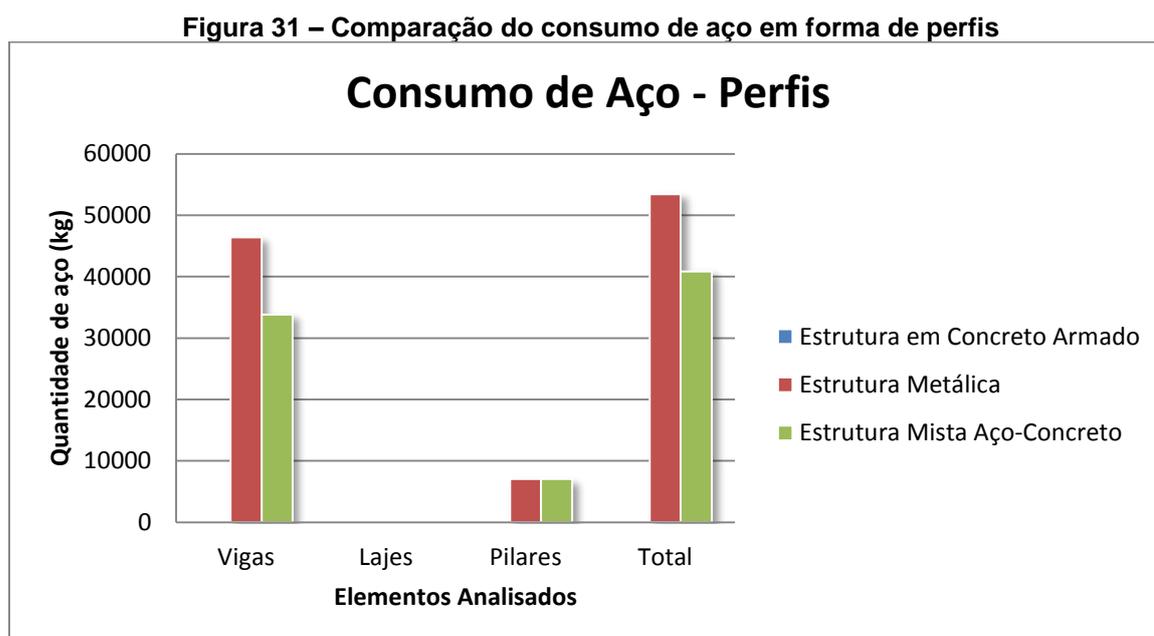
É possível observar pelo gráfico que o único elemento misto que se utiliza de aço estrutural em forma de barras foi a laje mista. Os pilares mistos utilizados na estrutura não apresentam armadura, pois segundo Queiroz *et al* (2001), no caso de tubos preenchidos por concreto normalmente as armaduras são dispensáveis.

Já para o edifício em concreto armado, todos os elementos utilizaram aço estrutural em forma de barras e a laje da edificação em aço por ter sido considerada maciça de concreto, apresenta a mesma quantidade de armadura que o mesmo elemento estrutural na edificação em concreto armado.

Quando comparado o consumo de aço utilizado entre os três sistemas estruturais (concreto x misto aço-concreto x metálico), verifica-se que o edifício formado por elementos mistos consumiu apenas 3,2% do total consumido pela edificação em concreto armado. Já para a estrutura metálica, 71,1% do total da armadura consumida no sistema estrutural em concreto armado.

De acordo com Silva (2010), é interessante ressaltar que as armaduras existentes na laje mista possuem finalidades específicas, como controlar a fissuração do concreto, e essas são posicionadas na parte superior das lajes e colocadas em forma de telas, ganhando-se na produtividade da execução das lajes mistas. Em contrapartida, para a construção da laje maciça se faz necessário o uso de formas e escoramentos, bem como de barras de aço isoladas. O tempo gasto na execução destes serviços (formas, escoramentos e armadura) também deve ser levado com consideração, com isso percebe-se que a laje mista apresenta facilidade de execução e, por consequência, menor tempo de execução, tornando-a competitiva frente às lajes existentes no mercado.

A análise comparativa do consumo de aço estrutural em forma de perfis é ilustrada na Figura 31.



Fonte: Autora

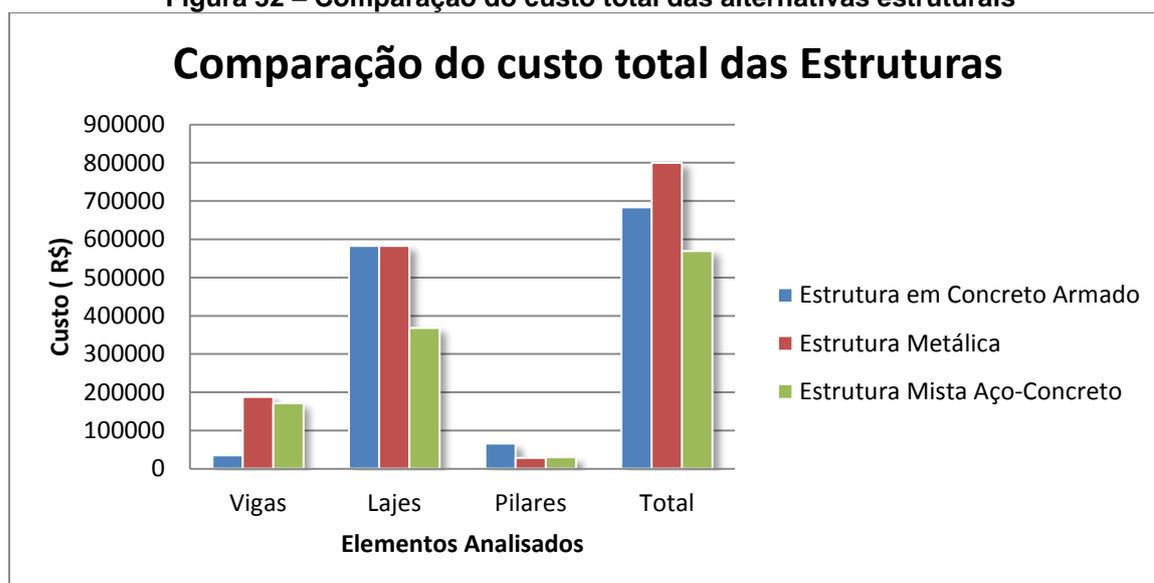
Ao examinar o gráfico, percebe-se que o maior consumo de perfis foi nas vigas das edificações estruturadas em sistema misto e no metálico, onde o perfil I foi escolhido para cumprir essa função. Já no caso dos pilares, foi calculado o mesmo perfil para a estrutura metálica e mista aço-concreto, pois não foi considerado no seu dimensionamento o aumento da capacidade de resistência do pilar devido o preenchimento do perfil por concreto, por efeito de confinamento.

O perfil laminado obtido para as vigas considerando o sistema construtivo misto aço-concreto (viga mista) foi 27% mais leve, em relação ao sistema construtivo em aço, ainda com redução de 21 cm de sua altura, o que representa um grande ganho arquitetônico no lançamento estrutural.

7.3 Consumo total das estruturas

Com o intuito de se comparar o custo total das três alternativas estruturais foram somados os custos de todos os elementos analisados e descritos nas tabelas orçamentárias do capítulo anterior. Com os dados destas tabelas orçamentárias, construiu-se o gráfico da Figura 32 que compara o consumo, em reais, dos itens analisados para o edifício estruturado em concreto armado, aço e misto aço-concreto.

Figura 32 – Comparação do custo total das alternativas estruturais



Fonte: Autora

Ao examinar as informações colhidas e o gráfico acima, calcula-se que a diferença percentual entre os custos da estrutura em sistema misto e a estrutura metálica (mais cara) foi de 28,8%. A diferença percentual entre a estrutura em concreto armado e a estrutura metálica foi de 14,5%. Já na comparação da edificação com elementos mistos com a mesma em concreto armado, observou-se que o custo da alternativa do método construtivo misto é 16,7% menor em relação a opção em concreto armado. A Tabela 9 abaixo resume todos os valores dados.

Tabela 9 – Diferença percentual para cada sistema

Diferença Percentual		
Metálica x Mista	Metálica x Concreto	Concreto x Mista
28,8%	14,5%	16,7%

Cabe salientar que não foi contabilizado o custo do escoramento para o edifício em concreto, desta forma, as diferenças percentuais entre os sistemas construtivos analisados podem sofrer pequenas alterações. Além disso, as formas não são compostas apenas de madeirit plastificado, mas também de sarrafos, caibros, etc, sendo que estes materiais, exceto o madeirit, não foram contabilizados e seus custos não foram computados neste trabalho. Com isso, é possível afirmar que uma análise mais aprimorada dos custos destes materiais deve ser feita, a fim de se comparar com maior propriedade os três sistemas estruturais aplicados separadamente neste edifício (SANTOS, 2010).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após análise, constata-se que a estrutura em sistema misto aço-concreto apresentou o menor custo, seguido pela estrutura em concreto armado e por último a metálica. A diferença percentual do edifício estruturado com o sistema estrutural mais oneroso, metálico, e o mais em conta, misto aço-concreto, foi de 28,8%. No entanto, a escolha do sistema engloba muitos outros fatores além do custo final da obra, como prazos, disponibilidade de materiais e mão-de-obra. Portanto, é de extrema importância o planejamento da obra analisando-se as suas prioridades e as circunstâncias em que está inserida. Além disso, é fundamental para a definição adequada do sistema construtivo a realização de um refinamento no dimensionamento estrutural, de forma a proporcionar maior precisão de cálculo e um melhor rendimento dos elementos constituintes dos sistemas estruturais.

Ao fazer a concepção estrutural de qualquer tipo de edificação, o engenheiro deve ter em mente vários aspectos, tais como manter a estética e a funcionalidade do projeto arquitetônico, ideia aproximada dos esforços atuantes na estrutura, métodos construtivos possíveis e os respectivos custos associados. A escolha do sistema estrutural de um edifício, em geral, é influenciada por imposições arquitetônicas, rotina construtiva ou ainda pela infra-estrutura da região. Mesmo assim, o engenheiro de estruturas tem de buscar, entre todas as possibilidades, a estruturação mais econômica para o seu projeto.

No caso do sistema misto-aço concreto, pode-se citar como características vantajosas as estruturas em geral: um prazo mais curto de execução, vãos maiores entre pilares, redução do consumo de madeira para a confecção de fôrmas e escoramentos, dentre outros fatores. Em estruturas de edifícios comerciais constituídos por esse sistema pode-se obter redução no prazo de execução na ordem de 35% quando comparados com as estruturas de concreto armado convencional. Por ser utilizada tanto em edificações em estrutura metálica, como em estrutura em concreto, a solução construtiva mista é competitiva principalmente em situações onde os vãos variam de 2m a 4m. Nessa condição, a laje mista dispensa escoramentos e, conseqüentemente, agiliza o cronograma da obra.

O uso de elementos mistos no Brasil ainda cresce gradativamente com o aumento da produção e fornecimento dos materiais componentes desse sistema construtivo, além de uma melhor qualificação da mão de obra.. Deste modo, é imprescindível a continuidade nas pesquisas relacionadas ao assunto para que o conhecimento relativo a este método construtivo seja difundido entre os profissionais da área.

7.1 Sugestões para nova pesquisa

A pesquisa deve servir de embasamento teórico para outras verificações baseadas no sistema construtivo misto aço-concreto e sugere-se investigações mais aprofundadas que não fizeram parte do escopo deste trabalho, tais como a consideração da semi-rigidez das ligações do pórtico, a influência dos esforços devido as cargas de vento e de possíveis sistemas de contraventamentos. Além disso, a análise completa do dimensionamento segundo a NBR 8800:2008, que constam diversas verificações como a flambagem em pilares, cisalhamento longitudinal e vertical em lajes, dentre outros, poderá melhorar o grau de precisão do dimensionamento e dos custos envolvidos na execução cada sistema estrutural. Por fim, é importante que existam outras pesquisas que aprofundem o conhecimento de novas tecnologias e técnicas de dimensionamento desse sistema construtivo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. T. **Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado**. São Carlos, 1998. 97p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

ALVA, G. M. S. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto**. 2000. 296f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

ALVA, G. M. S; MALITE, M. **Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto**. São Carlos. 34p. Caderno de Engenharia de estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, p. 51-84, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120 - **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2000.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681– **Ações e segurança nas estruturas - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323– **Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). *Revisão da NB-1 e comentários*

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008.

CADERNOS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS, São Carlos: USP/EESC v. 7, n. 25, p. 51-84, 2005. ISSN: 1809-5860.

CATAI, E. **Análise dos efeitos de retração e fluência em vigas mistas**. 2005. 156f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Estruturas, USP, São Carlos, 2005.

CLÍMACO, J. C. T. S.; **Estruturas de concreto armado: Fundamento de projeto, dimensionamento e verificação**. 2ª ed. revisada. Brasília: Editora Universidade de Brasília: Finatec, 2008.

COUTINHO, G. P.; **Análise do desempenho estrutural em função da continuidade de vigas mistas aço-concreto**. 2013. 70f. TCC (Graduação) – Centro Universitário de Brasília, UniCEUB, 2013.

CYPE Engenieros. Software técnico. Disponível em: <http://www.brasil.geradordeprecos.info/obra_nova/Estruturas>. Acesso em 16 de maio, 20:02 min.

DE NARDIN, S. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. 162f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de aço: Conceitos, técnicas e linguagem**. São Paulo: Zigate Editora, 1997.

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

HIGAKI, B. E. **Análise teórica e experimental de vigas mistas de aço e concreto e laje com vigotas pré-moldadas e lajotas cerâmicas em um pavimento tipo**. 2009. 184f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

INABA, R. **Construções Metálicas: o uso do aço na construção civil, 2010**. Disponível em: <<http://www.metallica.com.br/construcoes-metalicas-o-uso-do-aco-na-construcao-civil>>. Acesso em 16 maio de 2014, 16:29min.

JOHNSON, R. P.; **Composite structures of steel and concrete**. Oxford: Blackwell Scientific Publications vol. 1. 1994.

LIMA, Y. D. C. **Alternativas de sistemas de lajes para edifício em aço: Estudo comparativo.** São Carlos. 122p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2009.

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

NÓBREGA, A. P. M. **Análise do comportamento de pilares mistos aço-concreto em situação de incêndio.** 2003. 253f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2003.

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

PANNONI, F. D.; SILVA, V. P. **Estruturas de aço para edifícios: Aspectos tecnológicos e de concepção.** São Paulo: Blucher, 2010.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SANTOS, T. J. **Edifícios de Múltiplos Pavimentos Estruturados em Concreto, Aço e em Elementos Mistos de Aço e Concreto: Análise Comparativa.** 2010. 119p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de São Carlos, UFSC, São Carlos, 2010.

9 ANEXOS

9.1 Anexo A: Cálculos - Estrutura em concreto

- **CONCRETO ARMADO**

- Laje Maciça

$$H = \frac{l_x}{30 \text{ a } 35} = \frac{500}{30} \text{ a } \frac{500}{35} = 16,67 \text{ a } 14,29$$

Será adotado $H = 15 \text{ cm}$

Deve-se então verificar se as tensões atuantes nos elementos estruturais são menores ou iguais a tensão admissível.

$$\sigma = \frac{M * y}{I_x}$$

Onde:

M - Momento fletor;

y - Altura da linha neutra em centímetro, no caso será metade da altura da laje, 7,5 cm;

I_x - Momento de inércia da peça, igual à : $I_x = \frac{B * h^3}{12}$

$$I_x = \frac{500 * 15^3}{12} = 14.0625 \text{ cm}^4$$

Assim, para o momento maior momento positivo de 65,6 KN.m as tensões atuantes nas lajes será iguais a:

$$\sigma_+ = \frac{6560 * 7,5}{140625} = 0,35 \text{ KN/cm}^2$$

- Vigas

A revisão da NB-1 (1997) recomenda que a largura mínima para as vigas seja de 12cm, e em casos especiais de concretagem, admitem-se 10cm. Se necessário, aumenta-se a largura da viga em múltiplos de 5. No caso, a altura da viga foi obtida pelo simples cálculo:

$$H = \frac{l}{10} = \frac{500}{10} = 50 \text{ cm}$$

20x50 cm

Sendo,

$$I_x = \frac{20 * 50^3}{12} = 208333,33 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_+ = \frac{6560 * 25}{208333,33} = 0,79 \text{ KN/cm}^2$$

- Pilares

Variações nas dimensões do pilar nos diversos pavimentos, além de dificultar a forma, as vezes aumenta o consumo de aço (ALBUQUERQUE, 1999). Portanto, buscou-se seguir uma padronização nas dimensões dos elementos estruturais por uma questão de facilidade e segurança da edificação.

O pré-dimensionamento dos pilares deve levar em conta a área de influência. Esse processo diz respeito a área da laje que será sustentada por determinado pilar e consiste normalmente em dividir pela metade as distâncias entre os eixos dos pilares adjacentes e então é calculada a área de influência com essas extensões. Após esse cálculo e então possível calcular a área de concreto que será utilizada no pilar.

Para essa edificação tem-se:

$$A_c = \frac{30 * \alpha * A * (n + 0,7)}{f_{ck} + 0,01 * (69,2 - f_{ck})}$$

Onde:

$A_c = b \times h$, que é área da seção de concreto (cm²)

α = coeficiente que leva em conta as excentricidades da carga, no caso igual será igual à 1,3.

A = área de influencia do pilar, no caso igual à 25 m²

n = número de pavimentos-tipo, no caso serão 3 pavimentos.

f_{ck} = resistência característica do concreto, no caso 3,5 KN/cm²

$$A_c = \frac{30 * 1,3 * 25 * (3 + 0,7)}{3,5 + 0,01 * (69,2 - 3,5)} = 867,8 \text{ cm}^2 \rightarrow$$

sendo $b = 20\text{cm}$, a altura será $h = 45\text{cm}$

$\therefore 20 \times 45 \text{ cm}$

$$I_x = \frac{20 * 45^3}{12} = 151875 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_+ = \frac{6560 * 22,5}{151875} = 0,97 \text{ KN/cm}^2$$

9.2 Anexo B: Cálculos - Estrutura metálica

- **AÇO**

- Lajes maciças

Será o mesmo pré-dimensionamento da estrutura em concreto armado.

H = 15 cm

- Vigas

O pré-dimensionamento da altura da viga pode ser feito pelo cálculo:

$$H = \frac{l}{(12 \text{ a } 15)} = \frac{500}{12} \text{ a } \frac{500}{15} = 41,67 \text{ a } 33,33$$

O perfil de aço adotado para compor a viga de aço é o perfil laminado W 360x32,9 da "Gerdau". O aço que o compõe é o ASTM A572 Gr 50 que possui tensão de escoamento $f_y = 34,5 \text{ KN/cm}^2$.

O perfil tem momento de inércia, I_x , igual a 8.358 cm^4 , $y = 17,45 \text{ cm}$ e $A = 42,1 \text{ cm}^2$, dados pelo fabricante.

Pode-se assim, fazer as verificações necessárias para as tensões admissíveis na viga.

$$\sigma_+ = \frac{6560 * 17,45}{8358} = 13,70 \text{ KN/cm}^2$$

$$\sigma_{sd} = \frac{f_y}{1,15} = \frac{34,5}{1,15} = 30 \text{ KN/cm}^2$$

A tensão admissível do aço, σ_{sd} , é maior que as tensões atuantes na estrutura, portanto a verificação foi atendida.

- o Pilares

O perfil de aço tubular adotado para compor o pilar é o perfil laminado de seção circular da "Vallourec & Mannesmann Tubes – V&M do Brasil". O aço que o compõe é o VMB 250 que possui tensão de escoamento $f_y = 25 \text{ KN/cm}^2$.

No estado limite ultimo a tensão admissível do aço (σ_{adm}) é f_y/γ_s , sendo o coeficiente de segurança para o aço, γ_s , igual a 1,15, $\sigma_{adm} = 21,74 \text{ KN/cm}^2$. Com isso é possível determinar as dimensões do perfil pelo método dos estados limites:

$$\sigma \leq \sigma_{adm}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{F}{A} \rightarrow A_{aço} \geq \frac{F}{\sigma_{adm}}$$

$$A_{aço} \geq \frac{288,8}{21,74} = 13,3 \text{ cm}^2$$

Baseado no catálogo de tubos estruturais da Vallourec & Mannesmann Tubes – V&M do Brasil", 2012, é possível escolher o perfil circular de diâmetro 101,6 mm com área de $16,9 \text{ cm}^2$, $P = 13,3 \text{ Kg/m}$, $I = 195 \text{ cm}^4$ e $y = 5,08 \text{ cm}$.

9.3 Anexo C: Cálculos - Estrutura mista aço-concreto

- **MISTO AÇO-CONCRETO**

- **Vigas Mistas**

Uma vez obtido o momento fletor solicitante, calcula-se o momento fletor do perfil adotado, seguindo as recomendações da NBR8800:2008. O perfil de aço adotado para compor a viga mista biapoiada é o perfil laminado W 150 x 24,0 da “Gerdau” pois atende a seguinte condição:

$$W > W_{min} = \frac{M_{sd}}{f_y} = \frac{6560}{34,5} = 190,14 \text{ cm}^3$$

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

$$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$$

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

b) Geometria da seção:

$$d = 160 \text{ mm}$$

$$b_f = 102 \text{ mm}$$

$$h = 139 \text{ mm}$$

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

$$t_f = 10,3 \text{ mm}$$

$$A = 31,5 \text{ cm}^2$$

- Largura Efetiva

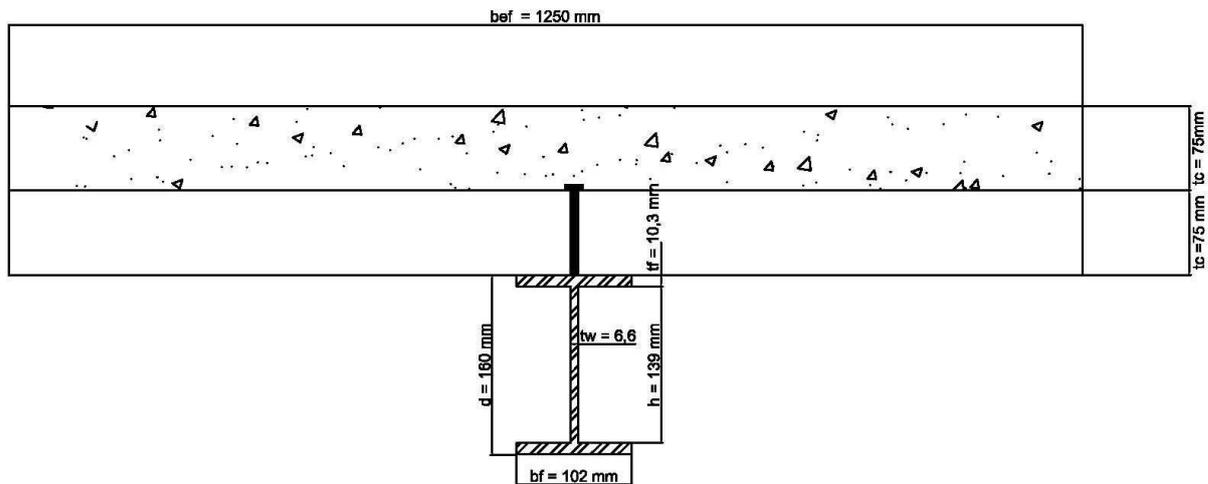
A largura efetiva, b_{ef} , da mesa de concreto será o menor valor das opções dadas no item 5.1.4.1 deste trabalho, no caso, um oitavo do vão da viga, ou seja, $b_{ef} = \frac{1}{8} * 500 = 62,5 \text{ cm}$, para cada lado do eixo da viga mista.

A laje mista adotada tem sua altura pré-dimensionada pelo cálculo:

$$H_{laje} = \frac{l_x}{25 \text{ a } 30} = \frac{500}{25} \text{ a } \frac{500}{30} \rightarrow H_{laje} = 15 \text{ cm}$$

Assim, a laje mista adotada terá altura total de 150 mm e altura acima da fôrma de aço, t_c , de 75 mm com nervuras perpendiculares ao eixo da viga. A seção transversal completa da viga mista pode ser representada pela Figura 33.

Figura 33 – Seção transversal da viga mista V1



A seção transversal para ser classificada no cálculo em análise plástica deve obedecer a equação: $h/t_w \leq 5,7\sqrt{E/f_{yd}}$

$$\frac{139}{6,6} \leq 5,7 \sqrt{\frac{200.000}{345}}$$

$$21,06 \leq 137,24$$

O dimensionamento da viga mista será realizado de acordo com o item 5.1, baseado na NBR 8800:2008, para vigas mistas de alma cheia com interação parcial e conectores tipo pino com cabeça.

- Cálculo do momento resistente admitindo-se ligação parcial

Para calcular a resistência global da conexão aço-concreto ($\sum Q_{Rd}$) utiliza-se o valor mínimo do grau de conexão dado por:

$$\eta = 1 - \frac{E}{578 * f_y} (0,75 - 0,03L_e) \geq 0,40$$

$$\eta = 1 - \frac{200.000}{578 * 345} * (0,75 - 0,03 * 5) = 0,60 = 60\%$$

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

$$0,85 * f_{cd} * b_{ef} * t_c = 0,85 * \frac{3,5}{1,4} * 125 * 7,5 = 1992,2 \text{ KN}$$

$$A_a * f_{yd} = 31,5 * \frac{34,5}{1,15} = 945 \text{ KN} \rightarrow \text{Será este, por ser o menor valor}$$

$$\text{Assim, } \Sigma Q_{Rd} = 0,6 * 945 = 567 \text{ KN} = C_{cd}$$

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

$$a = \frac{C_{cd}}{0,85 * f_{cd} * b} = \frac{567}{0,85 * \frac{3,5}{1,4} * 62,5} = 4,27 \text{ cm}$$

A resultante de compressão do aço é calculada por:

$$C_{ad} = \frac{1}{2} (A_a * f_{yd} - C_{cd}) = \frac{945 - 567}{2} = 189 \text{ KN}$$

Força resistente de tração é dada por:

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} = 567 + 189 = 756 \text{ KN}$$

Para conhecer a localização da linha neutra no perfil é utilizada a relação $A_{af} * f_{yd}$, se essa for maior que C_{ad} a linha neutra se encontra na mesa, mas caso o resultado seja menor ou igual a C_{ad} a L.N. estará na mesa superior. Assim tendo:

$$A_{af} * f_{yd} = (b_f * t_f) * f_{yd} = 10,2 * 1,03 * \frac{34,5}{1,15} = 315,18 \text{ KN}$$

$C_{ad} < A_{af} * f_{yd}$, portanto a linha neutra no perfil se encontra na mesa superior, a uma profundidade, medida pela face superior do perfil, igual a:

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{af} * f_{yd}} * t_f = \frac{189}{315,18} * 1,03 = 0,62 \text{ cm}$$

Logo a posição do centro de gravidade da seção de aço comprimida, medida a partir da face superior do perfil é dada por $y_c = \frac{0,62}{2} = 0,31 \text{ cm}$.

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

$$y_t = \frac{t_f * b_f * \frac{t_f}{2} + t_w * h * \left(\frac{h}{2} + t_f\right) + (t_f - y_p) * b_f * \left(\frac{(t_f - y_p)}{2} + h + t_f\right)}{t_f * b_f + t_w * h + (t_f - y_p) * b_f} =$$

$$\frac{1,03 * 10,2 * 5,1 + 0,66 * 13,9 * (6,95 + 1,03) + (1,03 - 0,62) * 10,2 * \left(\frac{(1,03 - 0,62)}{2}\right) + 13,9 + 1,03}{1,03 * 10,2 + 0,66 * 13,9 + (1,03 - 0,62) * 10,2}$$

$$y_t = 7,97 \text{ cm}$$

O cálculo do momento resistente é dado por:

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_f + d - y_t \right) \right]$$

$$M_{Rd} = 1 * \left[189 * (16 - 7,97 - 0,31) + 567 * \left(7,5 - \frac{4,27}{2} + 7,5 + 16 - 7,97 \right) \right]$$

$$M_{Rd} = 133,07 \text{ KN.m} > M_{Sd} = 65,6 \text{ KN.m}$$

○ Conectores de Cisalhamento

Adotando-se o conector do tipo pino com cabeça (*stud bolt*) com diâmetro, \emptyset , de 15,9 mm, $f_{UCS} = 41,5 \text{ MPa}$ e $E_c = 0,85 * 5600 * \sqrt{f_{ck}} = 4760\sqrt{35} = 28.160,5 \text{ MPa}$

A força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento tipo pino com cabeça pode ser calculada pelo menor dos seguintes valores, com base no item 4.2.3.

$$A_{cs} = \frac{\pi * \emptyset^2}{4} = 1,99 \text{ cm}^2$$

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} * \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} * E_c}}{\gamma_{cs}} = \frac{1}{2} * \frac{1,99 \sqrt{3,5 * 28.160,5}}{1,25} = 249,90 \text{ KN}$$

$$Q_{Rd} = \frac{R_g * R_p * A_{cs} * f_{UCS}}{\gamma_{cs}} = \frac{1,0 * 1,0 * 1,99 * 41,5}{1,25} = 66,07 \text{ KN}$$

A resistência de um conector será igual a 66,07 KN. A força solicitante é menor que a resistente (52,5 KN), portanto esse conector pino com cabeça resistirá aos esforços.

- Numero de conectores, admitindo-se a interação parcial

$$n = \frac{\sum Q_{Rd}}{Q_{Rd}} = \frac{567}{66,07} \cong 9 \text{ conectores}$$

O espaçamento longitudinal entre os conectores é igual a:

$$e = \frac{2500}{9} \cong 278 \text{ mm}$$

Os espaçamentos máximos e mínimos recomendados pela NBR 8800:2008 são:

$$e_{m\acute{a}x} = 8 * t_c = 8 * 75 = 600 \text{ mm}$$

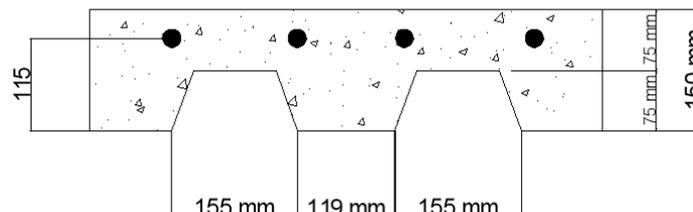
$$e_{m\acute{i}n} = 4 * \varnothing = 4 * 15,9 = 63,6 \text{ mm}$$

Assim, o espaçamento longitudinal calculado atende às recomendações da norma.

- Lajes Mistas

A seção da laje mista considerada está representada abaixo na Figura 34. O perfil da fôrma de aço escolhido é “Steel Deck” MF-75 com espessura de 1,25 mm, aço ZAR-280 ($f_y = 28 \text{ KN/cm}^2$) e resistência do concreto, $f_{ck} = 3,5 \text{ KN/cm}^2$.

Figura 34 – Seção da laje mista



O esforço cortante máximo a ser considerado será:

$$V_{sd} = 52,5 \text{ KN}$$

A verificação do momento fletor será baseado no item 5.2.1.1 deste trabalho, mas primeiramente é necessário determinar a posição da linha neutra plástica. Sendo determinado pelo fabricante a área $A_{F,ef} = 17,71 \text{ cm}^2$.

$$N_{pa} = A_{F,ef} * \frac{f_{yF}}{\gamma_F} = 17,71 * \frac{28}{1,15} = 431,2 \text{ KN}$$

$$N_c = 0,85 * 750 * \frac{3,5}{1,4} = 1593,75 \text{ KN}$$

Como $N_c > N_{pa}$ a linha neutra plástica encontra-se acima da fôrma de aço.

Assim, pode-se determinar a altura do bloco de compressão do concreto, a , que fará parte do cálculo do momento resistente de projeto em seguida.

$d_F = 102,7 \text{ mm}$ dado pelo fabricante;

$$a = \frac{N_{pa}}{0,85 * f_{cd} * b} = \frac{431,2}{0,85 * \frac{3,5}{1,4} * 100} = 2,03 \text{ cm}$$

Portanto,

$$M_{Rd} = N_{pa}(d_F - 0,5 * a) = 431,2 * (10,27 - 0,5 * 2,03) = 3991 \text{ KN.m}$$

Como $M_{Sd} = 65,6 \text{ KN.m}$ e M_{Rd} é menor que esse valor, a verificação está atendida.

- Pilares mistos

Este cálculo será igual a do pilar de aço pois o concreto interno pode ser desprezado no pré-dimensionamento deste tipo de pilar.

Portanto, o perfil de aço tubular adotado para compor o pilar misto é o perfil laminado de seção circular com diâmetro de 101,6 mm e área de 16,9 cm² da "Vallourec & Mannesmann Tubes – V&M do Brasil".